Más allá de los límites del crecimiento

Donella H. Meadows,
Dennis L. Meadows,
Jørgen Randers

EL PAIS
AGUILAR

Título original: *Beyond the limits*
©1991 by Donella H. Meadows and Dennis Meadows
©De la traducción: Carlos Alberto Schvartz
©1992, Ediciones El País S.A./Aguilar S.A. de Ediciones
Juan Bravo, 38. 28006 Madrid.
Teléfono 322 47 00
Telefax 322 47 71

• Aguilar, Altea, Taurus, Alfaguara, S.A.
Beazley 3860. 1437 Buenos Aires

• *Aguilar, Altea, Taurus, Alfaguara S. A. de C. V.*
Avda. Universidad, 767, Col. del Valle,
México, D.F. C. P. 03100

ISBN: 84-03-59256-6
Depósito legal: M-8.605-1994
©Diseño de cubierta: Paniagua/Calleja

PRIMERA EDICIÓN: NOVIEMBRE 1992
SEGUNDA EDICIÓN: FEBRERO 1993
TERCERA EDICIÓN: ABRIL 1994

Todos los derechos reservados.
Esta publicación no puede ser
reproducida, ni en todo ni en parte,
ni registrada en o transmitida por,
un sistema de recuperación
de información, en ninguna forma
ni por ningún medio, sea mecánico,
fotoquímico, electrónico, magnético,
electroóptico, por fotocopia,
o cualquier otro, sin el permiso previo
porescrito de la editorial.

ÍNDICE

PRÓLOGO A LA EDICIÓN ESPAÑOLA 9
PRESENTACIÓN 13
AGRADECIMIENTOS 15
INTRODUCCIÓN 19
NOTAS SOBRE EL LENGUAJE 27

Capítulo 1:
SOBREPASAMIENTO 29

Capítulo 2:
LA FUERZA MOTRIZ: CRECIMIENTO EXPONENCIAL 43

Las matemáticas del crecimiento exponencial 44
Cosas que crecen exponencialmente 49
Crecimiento de la población mundial 52
Crecimiento de la industria mundial 62
Más pobreza, más gente, más pobreza 66

Capítulo 3:
LOS LÍMITES: FUENTES Y SUMIDEROS 75

Recursos renovables 79
Recursos no renovables 99
Sumideros para contaminación y residuos 119
Más allá de los límites de los insumos globales 132

Capítulo 4:
LA DINÁMICA DEL CRECIMIENTO EN UN MUNDO FINITO ... 139

Objetivos y estructura del World3 139
Límites y ausencia de límites 151
Límites y retrasos 155
Sobrepasamiento y colapso 164
World3: dos escenarios posibles 167
Por qué *sobrepasamiento* y colapso 173

Capítulo 5:
REGRESANDO DESDE MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES:
LA HISTORIA DEL OZONO 179

El crecimiento 180
El límite 182
Las primeras señales 185
La primera respuesta 187
Erosión: el agujero de ozono 188
La siguiente respuesta 192
Viviendo sin los CFC 195
¿La moraleja de la historia? 197

Capítulo 6:
TECNOLOGÍA, MERCADOS Y *SOBREPASAMIENTO* 199

Tecnología y mercados en el "mundo real" 201

Extendiendo los límites con tecnología en World3 205
Por qué la tecnología y los mercados por sí solos no pueden evitar el *sobrepasamiento* 218
Tecnología, mercados y la destrucción de la pesca 224
Resumen 227

Capítulo 7:
TRANSICIÓN HACIA UN SISTEMA SOSTENIBLE 229

Restricciones deliberadas al crecimiento 232
Restricciones al crecimiento junto con tecnologías mejoradas 236
La diferencia que pueden representar veinte años 241
¿Qué altura es demasiada altura? 242
La sociedad sostenible 248

Capítulo 8:
SOBREPASAMIENTO SIN COLAPSO 259

Las dos primeras revoluciones: agricultura e industria 260
La próxima revolución: sostenibilidad 263
Desarrollo de visiones 265
Construcción de redes 268
Decir la verdad 270
Aprendizaje 273
Amor 274

APÉNDICE:
INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA CON WORLD3 279

NOTAS 295
BIBLIOGRAFÍA ANOTADA 311
GLOSARIO DE TÉRMINOS DE SISTEMAS 321
ÍNDICE DE CUADROS E ILUSTRACIONES CON FUENTES 327
ÍNDICE ALFABÉTICO 343

PRÓLOGO
A LA EDICIÓN ESPAÑOLA

El Club de Roma escandalizó al mundo hace veinte años con un primer informe sobre *Los límites del crecimiento*, elaborado en el M.I.T. bajo la dirección de nuestro colega el Profesor Dennis Meadows, por encargo del Club de Roma. Se trataba de verificar si el desarrollo económico ilimitado podía tener futuro o si bien existían límites al crecimiento. Las conclusiones fueron demoledoras, pero tan pronto se superaron los efectos coyunturales de la crisis del petróleo de 1973, los países más industrializados volvieron a comportarse como *ciudades alegres y confiadas* que, si bien proclamaron el fin del desarrollismo, continuaron con la economía del derroche y de la cultura consumista, teniendo como principal objetivo el máximo crecimiento anual del producto nacional bruto, como si no existieran límites al crecimiento económico ni al proceso de acumulación de riqueza por unos pocos países industrializados, mientras se agiganta la brecha entre los países pobres y ricos.

Ahora, veinte años más tarde, se publica esta obra, *Más allá de los límites del crecimiento* (*Beyond the limits*, en su versión original inglesa), elaborada nuevamente bajo la dirección de Dennis Meadows y varios de sus antiguos colaboradores. Antes de asumir la presidencia del Club de Roma en enero de 1991 le expresé mi gran interés en tener una nueva versión

actualizada de aquel primer informe al Club de Roma. En aquella ocasión le pedí que revisara la base de datos y la metodología original, y tuviera en cuenta la profusa crítica emitida por aquel entonces, incluida la que tuvo lugar a lo largo de los debates en el propio seno de nuestro Club. Ante la importancia del trabajo acometido para esta segunda versión y el anuncio de que se convertiría en una obra fundamentalmente nueva, invité al Profesor Meadows para que expusiera sus primeras reflexiones y conclusiones ante el Consejo del Club de Roma, reunido en junio de 1991 en Buenos Aires. Más tarde, durante la Conferencia del Club de Roma en Punta del Este en noviembre del mismo año, tuvo lugar la primera presentación y el debate preliminar del texto provisional final de este importantísimo estudio retrospectivo y prospectivo, aparte del más reciente debate realizado durante la Conferencia del Club de Roma en Fukuoka (Japón) en mayo de este año, una vez publicadas ya las versiones inglesa, francesa y japonesa, entre otras.

El Club de Roma ha venido llamando a la conciencia de las mujeres y de los hombres sobre estos y otros temas, convencidos como estamos del potencial sin precedentes de saber que la humanidad posee y esperanzados con la capacidad de los hombres de recurrir, en tiempos difíciles, a sus mejores resortes y valores del espíritu. Consecuentemente, nuestros escritos nunca han desahuciado al mundo, pero sí, en cambio, urgido un tratamiento enérgico para su curación, empezando por llevar a la conciencia de todos la gravedad de los problemas que nos atenazan y contribuyendo a la reflexión sobre las soluciones concretas globales que se pueden y deben acometer.

En este intento, y mientras empieza a extenderse la aspiración de un desarrollo sostenible —es decir, que cada sociedad, cada país, cada región y el mundo entero puedan disfrutar de la mayor calidad de vida sin poner en peligro la biosfera ni la supervivencia de futuras generaciones—, uno de los factores importantes es, desde luego, lograr un crecimiento razonable de la población en vez de su actual crecimiento exponencial. Por otra parte, el desarrollo sostenible sólo se logrará a condición de un cambio radical en la gestión, producción y utilización eficaz de los recursos disponibles y, sobre todo, como resultado de modificar los hábitos consumistas desordenados, reconociendo que los parámetros del *estilo de vida* actualmente más extendidos son insostenibles en un próximo futuro y no corresponden a los de la calidad de vida que merece ser propugnada.

Tales son también, en lo esencial, los puntos de vista que, a mi parecer, comparten los autores de este nuevo escrito que, afortunadamente, ya ha empezado a ser objeto de un nuevo debate apasionado. Esta obra pretende despertar las conciencias adormiladas para tomar las decisiones apropiadas en favor del devenir esperanzado del mundo antes de que sea demasiado tarde. El Club de Roma se felicita por ello de este admirable nuevo esfuerzo dirigido por nuestro colega Dennis Meadows. Y yo me alegro, por otra parte, de que esta obra se difunda también en español gracias a esta cuidada edición de El País-Aguilar.

RICARDO DÍEZ HOCHLEITNER
Presidente del Club de Roma

Madrid, octubre de 1992

PRESENTACIÓN

Todos podemos aprender algunas lecciones de este libro, especialmente nosotros, los economistas. Podemos aprender algo acerca del fondo sobre el que se están desarrollando los procesos económicos y del espacio en el que se verifican, nuestro planeta Tierra. Ese fondo, ese espacio, es más grande comparativamente que los problemas que los economistas suelen afrontar, pero es finito, y toda actividad económica debe desarrollarse sobre, dentro o alrededor de él.

Dos cosas carecen de límite: el número de generaciones por el que debemos sentirnos responsables y nuestra capacidad de inventiva. La primera nos plantea un reto: alimentar y mantener, no sólo a las actuales, sino a todas las generaciones futuras, mediante el flujo limitado de recursos naturales de la tierra. La segunda, nuestra inventiva, puede crear políticas e ideas que contribuirán a hacer frente a ese reto.

Nuestra responsabilidad ante todas las generaciones se extiende especialmente a aquellos que en la actualidad viven en continentes pobres o en los distritos más necesitados de ciudades de todos los continentes. En el presente y el futuro se extiende a bastante más que asegurar comida y elementos materiales; se extiende a la conservación de un medio ambiente limpio.

Han pasado los tiempos en que los ingresos se hacían globalmente desiguales. Pero, al ritmo actual, llevaría demasiado tiempo alcanzar la

igualdad: cinco siglos. La posibilidad de mantener los actuales altos ingresos es harto dudosa. Las economías de mercado necesitan obviamente cierto nivel de intervención para proveer bienes públicos, para evitar una desigualdad mayor, y para aproximarse a la estabilidad.

El gran mérito de *Más allá de los límites del crecimiento* es mostrarnos dónde y cuándo podremos alcanzar las fronteras de lo posible y, en este sentido, clarifica las condiciones bajo las cuales el crecimiento sostenido, un medio ambiental limpio e ingresos equitativos pueden ser organizados. Demuestra que hay posibilidades excitantes, y que éstas son limitadas, más de lo que algunos economistas piensan. Revela que el nivel de ingreso medio posible continuado es más bajo hoy que hace veinte años, producto de nuestro fracaso en comprender los límites en el uso de los recursos naturales. El libro también muestra dónde la creatividad humana ha mejorado las perspectivas, como en la eficiencia de la energía, el reciclado de recursos y el incremento en la expectativa de vida de la humanidad.

Como economistas debemos estar agradecidos a los autores por mostrarnos dónde el curso actual del desarrollo humano amenaza con sobrepasar los límites, y por poner de relieve las contribuciones que la economía y otras disciplinas deben hacer para responder al gran reto de la humanidad: evitar la guerra, el hambre, la enfermedad, la contaminación, y construir un futuro capaz de subsistir.

JAN TIMBERGEN
Premio Nobel de Economía

AGRADECIMIENTOS

Inspiración

Este libro está dedicado a:

- Aurelio Peccei, fundador del Club de Roma. Su profunda preocupación por el mundo y su fe en la humanidad nos han inspirado a nosotros y a muchos otros para tener en cuenta e intervenir sobre las perspectivas del futuro a largo plazo.
- Jay W. Forrester, Profesor Emérito de la Sloan School of Management del Massachusetts Institute of Technology, y maestro de todos nosotros. Él diseñó el prototipo del modelo de ordenador que hemos utilizado en este libro, y su conocimiento del sistema nos ha ayudado a comprender el comportamiento de los sistemas económicos y del medio ambiente.

Administración

Para la preparación de este libro ha sido indispensable la colaboración de las siguientes personas, a quienes deseamos extender nuestra sentida gratitud:

- Ian y Margo Baldwin, de la Chelsea Publishing Company, por haber adoptado este proyecto y por haberle dedicado sus propias energías y los recursos de su empresa sin escatimar esfuerzos para su terminación.
- Angele Coojk, de la Universidad de New Hampshire, y Mardi McGregor, del Dartmouth College, por proveer constante y entusiasta apoyo logístico.
- Lew Feldstein y la New Hampshire Charitable Trust, por apoyar la creación de un centro de investigaciones políticas en New Hampshire.
- Suzanne MacDonald, por albergar en su casa largas sesiones de escritura y por alentar y sostener a los escritores exhaustos.
- Peter Matson, de Sterling Lord Literistic, por despegar a esta obra de la vieja "Límites..." e impulsarla hacia su publicación.
- Maria y Ewngelke Randers, por prestar durante muchas semanas a su marido y padre, respectivamente, para un proyecto al otro lado del Océano.
- Los residentes de la Foundation Farm, por mantener ardiendo los fuegos de la casa mientras uno de sus granjeros estaba ocupado con un libro.
- James Horning, por crear un medio en el Dartmouth College que nos proveyó del material y el apoyo intelectual necesario para investigar y preparar este libro.
- Barry Richmond y Steve Peterson, de High Performance Systems Inc., por el software STELLA II ©, que ha hecho al modelo World3 mucho más accesible de lo que fue hace 20 años.
- Entre los lectores y responsables de comentarios al texto se encuentran: William W. Behrens III, Allen Boorstein, Hartmut Bossel, Lester Brown, Chester Cooper, Herman Daly, Joan Davis, Judy Gabriel, Jay Harris, John Harte, James Horning, Nathan Keyfitz, Niels Meyer, Don Michael, Mario Molina, Rusell Peterson, Aromar Revi, John Sterman y Steve Viederman. No les hemos podido satisfacer a todos en cada detalle, pero sus comentarios fueron francos, alimentaron nuestras ideas, y resultaron útiles. Sus respuestas rápidas y enérgicas, pese a lo ajetreado de su actividad, dan testimonio de su compromiso para resolver las cuestiones suscitadas en este libro.

Donación

Los recursos para la preparación de *Más allá de los límites del crecimiento* fueron brindados por el Pew Scholars Program, Jane y Allen Boorstein, Jay Harris y William Welsh.

Esfuerzos

El equipo que llevó a cabo la investigación, utilizó el modelo informático, creó los gráficos, y escribió este libro estuvo compuesto por:

- Dr. Bert de Vries, del National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Holanda.
- Thomas Fiddaman, del Institute for Policy and Social Science Research, University of New Hampshire, EE UU.
- Dr. Donella H. Meadows, del Environmental Studies Program, Dartmouth College, EE UU.
- Dr. Jørgen Randers, Presidente de S. Sejersted Bodtker & Co. AS, Noruega.
- Diana Wright, del Environmental Studies Program, Dartmouth College, EE UU.

El proyecto original que produjo el modelo de ordenador World3 y *Los límites del crecimiento* se desarrolló en el System Dynamics Group de la Sloan School of Management del Massachusetts Institute of Technology. Fue encomendado por el Club de Roma y financiado por la Fundación Volkswagen. El equipo estuvo compuesto por:

Dr. Alison A. Anderson (EE UU)
Ilyas Bayar (Turquía)
Farhad Hakimzadeh (Irán)
Judith A. Machen (EE UU)
Dr. Donella H. Meadows (EE UU)
Nirmala S. Murthy (India)
Dr. Jørgen Randers (Noruega)
Dr. John A. Seeger (EE UU)
Dr. Erich K. O. Zahn (Alemania)
Dr. Jay M. Anderson (EE UU)
Dr. William W. Behrens III (EE UU)
Dr. Steffen Harbordt (Alemania)
Dr. Dennis L. Meadows (EE UU)
Dr. Peter Milling (Alemania)
Dr. Roger F. Naill (EE UU)
Stephen Schantzis (EE UU)
Marilyn Williams (EE UU)

INTRODUCCIÓN

Hace 20 años escribimos un libro titulado *Los límites del crecimiento*[1]. Describía las perspectivas de crecimiento en la población humana y la economía global durante el siglo siguiente. En él se suscitaron cuestiones tales como: ¿Qué pasaría si el crecimiento de la población mundial siguiera sin control? ¿Cuáles serían las consecuencias medioambientales si el desarrollo económico continuara a su paso actual? ¿Qué se puede hacer para asegurar una economía humana que provea lo suficiente para todos y que además tenga cabida dentro de los límites físicos de nuestro planeta?

El examen de estas cuestiones nos fue encomendado por el Club de Roma, un grupo internacional de distinguidos empresarios, estadistas y científicos. Nos solicitaron que tomáramos a nuestro cargo un proyecto de estudio de dos años en el Massachusetts Institute of Technology para estudiar las causas y consecuencias a largo plazo del crecimiento de la población, el capital industrial, la producción de alimentos, el consumo de recursos y la contaminación. Para poder seguir el rastro de estas entidades interactuantes, y para proyectar sus posibles senderos hacia el futuro, creamos un modelo de ordenador denominado World3[2].

Los resultados de nuestro estudio fueron descritos para el público en general[3] en *Los límites del crecimiento*. El libro desató furor. La combinación del ordenador, el MIT y el Club de Roma pronunciándose sobre el

futuro de la humanidad tenía un atractivo dramático irresistible. Los titulares de la prensa anunciaban:

UN ORDENADOR MIRA AL FUTURO Y TIEMBLA
UN ESTUDIO VISLUMBRA EL DESASTRE
PARA EL AÑO 2100
LOS CIENTÍFICOS ADVIERTEN SOBRE
LA CATÁSTROFE GLOBAL[4]

Nuestro libro fue debatido por parlamentos y sociedades científicas. Una importante compañía petrolera auspició una serie de anuncios publicitarios en los que se nos criticaba; otra estableció un premio anual para los mejores estudios que ampliaran su horizonte. *Los límites del crecimiento* despertó opiniones altamente favorables, y una lluvia de ataques desde la izquierda, la derecha y el sector medio de las grandes corrientes económicas.

El trabajo fue interpretado por muchos como la predicción del juicio final, pero no era una predicción en ninguno de los sentidos. No trataba acerca de un futuro prefigurado. Versaba sobre una elección. Contenía una advertencia, sin duda, pero también un mensaje promisorio. Aquí están las tres conclusiones resumidas que escribimos en 1972. La segunda de ellas es la promesa, una muy optimista, pero nuestros análisis la justificaban entonces y la siguen justificando ahora. Quizá debimos haberla puesto en primer lugar.

1. Si las actuales tendencias de crecimiento en la población mundial, industrialización, contaminación, producción de alimentos, y explotación de recursos continúa sin modificaciones, los límites del crecimiento en nuestro planeta se alcanzarán en algún momento dentro de los próximos cien años. El resultado más probable será una declinación súbita e incontrolable tanto de la población como de la capacidad industrial.

2. Es posible alterar estas tendencias de crecimiento y establecér unas condiciones de estabilidad económica y ecológica capaces de ser sostenidas en el futuro. El estado del equilibrio global puede ser diseñado de tal forma que las necesidades materiales básicas de cada persona sobre la tierra sean satisfechas y que cada persona, mujer u hombre, tenga igualdad de oportunidades para realizar su potencial humano individual.

3. Si la población del mundo decidiera encaminarse en este segundo sentido y no en el primero, cuanto antes inicie esfuerzos para lograrlo, mayores serán sus posibilidades de éxito[5].

Para nosotros esas conclusiones no suponían el advenimiento de la catástrofe, sino que constituían un reto: cómo lograr hacer una sociedad materialmente suficiente, socialmente equitativa y ecológicamente perdurable, más satisfactoria en términos humanos que la sociedad de nuestros días obsesionada por el crecimiento.

De una forma u otra, hemos estado trabajando en ese reto desde entonces. También han trabajado en ello otros millones de personas. Han estado explorando la eficiencia energética y los nuevos materiales, la resolución pacífica de conflictos y el desarrollo de las comunidades de base, la prevención de la contaminación en las fábricas y el reciclado en las ciudades, la agricultura ecológica y los protocolos internacionales para proteger la capa de ozono. Muchas cosas que han ocurrido en los últimos veinte años han facilitado el surgimiento de tecnologías, conceptos e instituciones que pueden crear un futuro continuado. Pero muchas otras han contribuido a perpetuar la pobreza, la destrucción de recursos, la acumulación de toxinas y la destrucción de la naturaleza, minando la capacidad de sostén de la tierra.

Cuando comenzamos a trabajar en este libro, nuestra intención era sólo documentar las tendencias contrapuestas y poner al día *Los límites del crecimiento* para su reedición con motivo de su vigésimo aniversario. Poco tardamos en descubrir que debíamos hacer algo más que eso. Mientras compilábamos las cifras, reabríamos el programa de ordenador y reflexionábamos acerca de lo que habíamos aprendido durante dos décadas, comprendimos que el paso del tiempo y la continuidad de muchas tendencias de desarrollo habían desplazado a la humanidad hacia una nueva posición en relación con sus límites.

En 1971 llegamos a la conclusión de que los límites físicos al uso humano de materiales y energías distaban aún varias décadas. En 1991, cuando revisamos los datos, el modelo de ordenador y nuestra propia experiencia del mundo, nos dimos cuenta de que, a pesar de las mejoras tecnológicas mundiales, una mayor consciencia y políticas medioambien-

tales más firmes, muchos flujos de recursos y de contaminación habían traspasado los límites sostenibles.

La conclusión fue una sorpresa para nosotros, y sin embargo no exactamente una sorpresa. En cierto sentido lo habíamos sabido durante todo el tiempo. Habíamos visto con nuestros propios ojos la deforestación, las torrenteras en las tierras de cultivo, los ríos marrones por los vertidos. Conocíamos la química de la capa de ozono y el efecto invernadero. Los medios habían hecho la crónica estadística de las reservas pesqueras. Descubrimos, cuando comenzamos a conversar con nuestros colegas acerca de que el mundo había "sobrepasado sus límites", que no cuestionaban dicha conclusión. Encontramos muchas referencias en la literatura de los últimos veinte años en las que los autores sugerían que los flujos de recursos y de contaminación habían ido ya demasiado lejos, algunos de ellos están citados en este libro.

Pero hasta que no comenzamos a actualizar *Los límites del crecimiento*, no dejamos que nuestras mentes se empaparan plenamente del mensaje. El mundo humano ha sobrepasado sus límites. La forma actual de hacer las cosas es insostenible. El futuro, para tener algún viso de viabilidad, debe empeñarse en retroceder, desacelerar, sanar. No se puede poner fin a la pobreza por el desarrollo material indefinido; debe hacérsele frente mientras la economía material humana se contrae. Como en el caso de cualquier otra persona, no deseábamos llegar a estas conclusiones.

Pero cuantos más datos compilábamos, más nítido y fuerte era el mensaje en ese sentido. Con cierta inquietud nos dirigimos hacia World3, el modelo informático que nos había ayudado hacía veinte años a integrar los datos globales y trabajar sobre sus proyecciones a largo plazo. Temíamos que ya no se pudieran encontrar en el modelo posibilidades creíbles, suficientes, de un futuro sostenible para el conjunto de la humanidad.

Pero, tal como resultó, sí lo obtuvimos. World3 nos mostró que en veinte años algunas opciones de alternativas sostenibles se habían estrechado, pero otras se habían ampliado. Teniendo en cuenta algunas de las tecnologías e instituciones inventadas a lo largo de esos veinte años, hay posibilidades reales de reducir el flujo de recursos consumidos y contaminantes generados por la economía humana al mismo tiempo que se incrementa la calidad de vida. Es incluso posible, concluimos, eliminar la pobreza mientras se acomoda el crecimiento demográfico implícito ya en la presente estructura de edad de la población, pero no si ese crecimiento prosigue de forma indefinida, no si sigue durante mucho tiempo, y no sin rápidas mejoras en la eficiencia de la utilización de los materiales y la energía y en la equidad de la distribución material y energética.

Hasta donde podemos alcanzar de los datos globales, del modelo World3 y de todo lo que hemos aprendido en los últimos veinte años, las tres conclusiones que delineamos en *Los límites del crecimiento* siguen siendo válidas, pero se deben reforzar. Ahora las hemos dejado establecidas como sigue:

1. La utilización humana de muchos recursos esenciales y la generación de muchos tipos de contaminantes han sobrepasado ya las tasas que son físicamente sostenibles. Sin reducciones significativas en los flujos de materiales y energía, habrá en las décadas venideras una incontrolada disminución *per cápita* de la producción de alimentos, el uso energético y la producción industrial.

2. Esta disminución no es inevitable. Para evitarla son necesarios dos cambios. El primero es una revisión global de las políticas y prácticas que perpetúan el crecimiento del consumo material y de la población. El segundo es un incremento rápido y drástico de la eficiencia con la cual se utilizan los materiales y las energías.

3. Una sociedad sostenible es aún técnica y económicamente posible. Podría ser mucho más deseable que una sociedad que intenta resolver sus problemas por la constante expansión. La transición hacia una sociedad sostenible requiere un cuidadoso equilibrio entre objetivos a largo y corto plazo, y un énfasis mayor en la suficiencia, equidad y calidad de vida, que en la cantidad de la producción. Exige más que la productividad y más que la tecnología; requiere también madurez, compasión y sabiduría.

Estas conclusiones constituyen una advertencia condicional, no una mera predicción. Ofrecen una elección de vida, no una sentencia de muerte. La elección no es necesariamente tenebrosa. No supone que los pobres queden congelados en su pobreza o que los ricos deban convertirse en pobres. Podría en realidad suponer el alcanzar finalmente los objetivos que la humanidad ha perseguido en sus continuos intentos de mantener el crecimiento físico.

Esperamos que la elección del mundo sea en favor de la sostenibilidad. Ésa es la razón última de escribir este libro. Pero no minimizamos la gravedad o la dificultad de esa elección. Pensamos que la transición hacia un mundo sostenible es posible técnica y económicamente, quizá incluso simple, pero también sabemos que es psicológica y políticamente intimidatoria. Tanta esperanza, tantas identidades personales, tanta moderna cultura industrial, se han construido sobre la premisa del perpetuo crecimiento material.

Un maestro, observando la reacción de sus estudiantes ante la idea de la existencia de límites, escribió una vez:

Cuando la mayoría de nosotros se enfrenta al ultimátum del desastre potencial, cuando escuchamos que es "necesario" elegir alguna forma de estabilidad planificada, cuando hacemos frente a la "necesidad" del diseño de un estado sostenible, nos sentimos empujados al desaliento, aun cuando nos demos plena cuenta de ello. Cuando somos enfrentados a nuestros recursos de esta forma, sentimos, intuimos, un cierto tipo de soledad cósmica que no podíamos haber previsto. Nos convertimos en huérfanos. Ya no nos seguimos viendo como criaturas de un orden cósmico, beneficiarios de un proceso histórico. Los límites al crecimiento niegan todo eso. Nos dicen, quizá por primera vez en nuestra experiencia, que el único plan debe ser el nuestro. De un solo golpe nos desnudan de la seguridad ofrecida por las formas pasadas de la providencia y el progreso; de otro, arrojan sobre nuestras reticentes manos la responsabilidad del futuro[6].

Nosotros atravesamos por toda la secuencia emocional —pena, soledad, responsabilidad reticente— cuando trabajamos sobre el proyecto del Club de Roma hace veinte años. Muchas otras personas, a través de muchos otros acontecimientos formativos, han pasado por una secuencia similar. Se puede sobrevivir a ella. Puede incluso abrir nuevos horizontes y sugerir futuros excitantes. Esos futuros nunca llegarán a ser, sin embargo, hasta que el mundo en su conjunto no se enfrente a ellos. Las ideas de límite, sostenibilidad, suficiencia, equidad y eficiencia no son barreras, obstáculos ni amenazas. Son guías hacia un mundo nuevo. La sostenibilidad, y no mejores armas o luchas por el poder o la acumulación material, es el reto último para la energía y creatividad de la raza humana.

Pensamos que la raza humana está preparada para ese reto. Pensamos que es posible un mundo mejor, y que la aceptación de límites físicos es el primer paso para alcanzarlo. Vemos una desaceleración de la insostenibilidad no como un sacrificio, sino como una oportunidad de dejar de golpear los límites de la tierra y comenzar a trascender límites autoimpuestos e innecesarios en instituciones humanas, estados mentales, creencias y éticas. Por eso decidimos finalmente no limitarnos a actualizar y reeditar *Los límites del crecimiento*, sino reescribirlo por completo y titularlo *Más allá de los límites del crecimiento*.

DONELLA H. MEADOWS
DENNIS L. MEADOWS
JØRGEN RANDERS

Durham, New Hampshire
Noviembre de 1991

NOTAS SOBRE EL LENGUAJE

En este libro se ha traducido el término sajón de *billion* por "mil millones" (el *milliard* francés).

Se distingue entre la tonelada estadounidense (2.000 libras o 907 kg) y la tonelada métrica (2.205 libras o 1.000 kg).

La palabra *capital* significa siempre aquí los medios materiales de producción de bienes y servicios: equipo, maquinaria, fábricas, *hardware*. Cuando nos referimos a los recursos monetarios necesarios para la construcción de una fábrica, los denominamos *capital financiero*.

A lo largo del libro se utilizan una serie de términos extraídos del análisis de sistemas. Se define cada término la primera vez que se utiliza, y se recogen todos ellos en un glosario al final del libro. Ejemplos de estos términos son: sistema, estructura, *sobrepasamiento* (*overshoot*, ver *Glosario*), crecimiento exponencial, bucle de retroalimentación (*feedback loop*), fuente, sumidero (*sink*) e insumos globales (*throughput*, ver *Glosario*).

Como todo el mundo, tenemos problemas con la elección de palabras para designar diferentes regiones del mundo. Tenemos reparos con las expresiones *desarrollado* y *en desarrollo* por motivos que se harán evidentes a medida que defendamos en este trabajo nuevos y diferentes modelos de desarrollo. Los términos *primer*, *segundo* y *tercer mundo*, que

hacen una distinción entre las economías de mercado occidentales, las economías de Europa que en el pasado estaban centralmente planificadas, y "el resto del mundo", están teñidos por una visión occidental que por añadidura se desvanece con rapidez. *Norte* y *Sur* son categorías de escasa precisión geográfica pero utilizadas habitualmente en los documentos de Naciones Unidas para referirse, en sentido lato, a regiones ricas y pobres respectivamente. Dado que en este texto se citan muchas fuentes en diferentes contextos, menudearán todos los términos antes señalados.

Sin embargo, creemos que la distinción que más se ajusta a nuestros objetivos es la de *industrializadas* y *menos industrializadas*. Con esos términos pretendemos describir el grado en que diferentes regiones del mundo (incluidas naciones enteras y también subdivisiones poblacionales dentro de una misma nación) han pasado por la revolución industrial: el grado en que sus economías han pasado del predominio agrícola a la dominación de la industria y los servicios, el grado en que su principal fuente de energía se basa en los combustibles fósiles o nucleares, el grado en que han absorbido los modelos de trabajo, tamaño familiar, hábitos de consumo y actitud mental de la moderna cultura tecnológica.

Finalmente, la distinción más importante que se hará en este libro es la que existe entre *crecimiento* y *desarrollo*.

> Ateniéndonos a la distinción del diccionario... *Crecer* significa incrementar el tamaño por la asimilación o acumulación de materiales. *Desarrollar* significa expandir o lograr la realización de potenciales de algo; alcanzar un estado de mayor completud, tamaño o mejoría. Cuando algo crece, se hace cuantitativamente más grande; cuando se desarrolla, se hace cualitativamente mejor o, al menos, diferente. El crecimiento cuantitativo y la mejoría cualitativa siguen leyes distintas. Nuestro planeta se desarrolla a lo largo del tiempo sin crecer. Nuestra economía, un subsistema de la tierra finita y sin crecimiento, debe eventualmente adaptarse a un patrón o modelo de desarrollo similar[7].

Creemos que no hay distinción que importe más mantener que ésa. Nos indica que, pese a existir límites al crecimiento, no tiene por qué haber límites al desarrollo.

Capítulo 1:

SOBREPASAMIENTO

> *El futuro ya no es lo que se esperaba que fuera, o lo que podría haber sido si el género humano hubiese sabido usar su cerebro y sus oportunidades con más eficacia. Pero el futuro aún puede convertirse en lo que de forma razonable y realista deseamos.*
>
> AURELIO PECCEI[8]

Overshoot es un término derivado del análisis de sistemas, de amplia difusión en la jerga económica, cuya equivalencia española es "sobrepasarse", aunque la fuerza del giro no sea equivalente. *Overshoot* (sobrepasarse) significa ir más allá de los límites inadvertidamente, sin habérselo propuesto. La vida cotidiana está plagada de pequeños y no tan pequeños "sobrepasamientos". Un coche sobre una calle helada puede patinar y sobrepasar (hemos optado por "sobrepasar" en lugar de "rebasar", porque la primera se ha hecho de uso habitual en estos temas) una señal de *stop*. Si se come y se bebe muy de prisa, se puede ir demasiado lejos antes de que el cuerpo envíe señales claras de que se debe parar.

A una escala mayor, una flota pesquera puede llegar a ser tan grande y eficiente que expolie la fauna ictícola de la que depende. Los promotores de la construcción pueden erigir más urbanizaciones que las que la gente está en condiciones de ocupar o dispuesta a adquirir. Una empresa de electricidad puede generar más energía que la que la economía puede utilizar.

Las causas subyacentes del *overshoot* son siempre las mismas. En primer lugar, hay movimiento rápido, acción o cambio. En segundo lugar, existe algún tipo de barrera o límite más allá del cual el movimiento, la acción o el cambio no deben ir. En tercer lugar, hay dificultades de control por distracción, datos falaces, una retroalimentación retardada, mala

información, respuesta lenta o simple inercia. El conductor va demasiado de prisa como para que los frenos actúen adecuadamente sobre la carretera deslizante. La flota pesquera desarrolla su capacidad de captura a mayor velocidad que los datos sobre el crecimiento de la población ictícola. La empresa de electricidad decide con demasiada rapidez, en condiciones de excesiva incertidumbre, iniciar la construcción de proyectos que lleva mucho tiempo desarrollar.

Este libro trata del fenómeno del *sobrepasamiento* a una escala mucho mayor, la escala en la que la población humana y la economía extraen recursos de la tierra y emiten desperdicios contaminantes hacia el medio ambiente. Muchas de estas tasas de extracción y emisión han crecido hasta magnitudes insoportables. El medio ambiente ya no las puede sostener. La sociedad humana ha sobrepasado sus límites por los mismos motivos que otros sobrepasamientos se producen. Los cambios son demasiado rápidos. Las señales aparecen tarde, son incompletas, están distorsionadas, son ignoradas o se las niega. La inercia es grande. Las respuestas son lentas.

Tras el *sobrepasamiento* puede desencadenarse una cierta serie de consecuencias posibles. Una de ellas, desde luego, es algún tipo de choque o *crash*. Otra es una rectificación deliberada, una corrección, una cuidadosa reducción de intensidad. Este libro explora esas dos posibilidades en cuanto atañen a la sociedad humana y al planeta que sostiene su actividad. Creemos que es posible una corrección y que puede desembocar en un deseable, suficiente, equitativo y sostenible futuro. También creemos que, si no se hace una corrección, un colapso de algún tipo es no sólo posible, sino seguro, y podría ocurrir dentro de las expectativas de vida de muchos de los que hoy en día asisten al espectáculo.

Éstas son afirmaciones tremendas. ¿Cómo hemos llegado a ellas?

Hemos investigado las implicaciones a largo plazo de las actuales tasas de cambio en la sociedad humana con cuatro tipos de instrumentos de observación —cuatro lentes distintas para poder enfocar el mundo en diferentes formas, tal como las lentes de un microscopio y un telescopio permiten observar diferentes estructuras—. Tres de estos instrumentos de observación son comunes, fáciles de describir y de transmitir a otros: la teoría científica y económica estándar sobre sistemas globales; la información estadística sobre los recursos mundiales y el medio ambiente; y un modelo de ordenador que nos permita integrar esa información. La mayor parte de este libro describe el uso de estas lentes, cómo fueron utilizadas y qué fue lo que nos permitieron ver.

Nuestra cuarta lente, probablemente la más importante, fue nuestra "cosmovisión", paradigma o forma fundamental de mirar. Todos tenemos una visión del mundo. Es siempre la determinante más decisiva de aquello que se ve. Y su descripción es casi imposible. La nuestra viene determinada por las sociedades industriales de Occidente en las que nos desarrollamos, por nuestra formación científica y económica, y por la considerable enseñanza recibida de los colegas en administración de recursos con quienes hemos trabajado en muchas partes del mundo. Pero el componente más importante de nuestro modo de ver o mirar, la parte que quizá sea menos ampliamente compartida, es nuestro punto de vista sobre los sistemas.

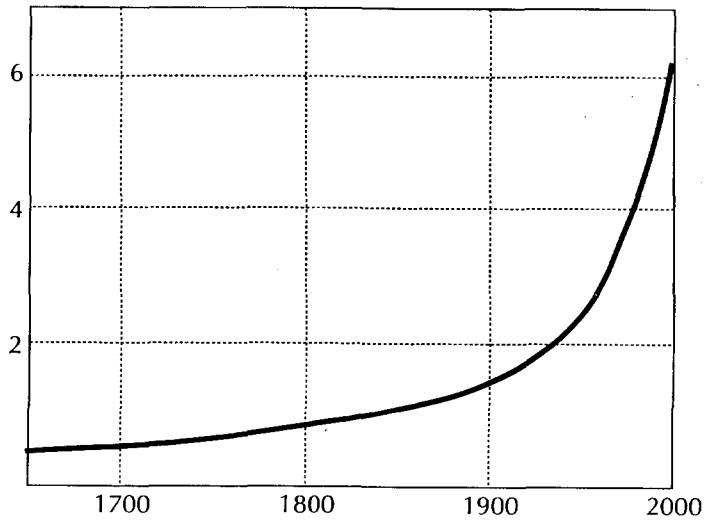
Un punto de vista sobre sistemas no es necesariamente mejor que cualquier otro, es simplemente distinto. Como cualquier punto de vista, como la cima de cualquier montaña a la que se asciende, permite ver algunas cosas que jamás se verían desde otro lugar, y al mismo tiempo impide la visión de otras. El estudio de sistemas nos ha enseñado a ver el mundo como un conjunto de modelos de comportamiento dinámico en desarrollo, tales como crecimiento, disminución, oscilación, *sobrepasamiento*. Nos ha enseñado a centrarnos en las interconexiones. Vemos la economía y el medio ambiente como un solo sistema. Vemos *stocks*, flujos, retroalimentaciones y umbrales en dicho sistema, y todos ellos determinan la forma en que el sistema se comporta.

El punto de vista sobre sistemas no es el único modo útil de ver el mundo, y no es el único que hemos utilizado. Pero sí es uno que consideramos particularmente informativo y excitante. Nos permite aproximarnos a los problemas de nuevas formas y descubrir posibilidades insospechadas. Pretendemos compartir aquí sus principales conceptos con ustedes, para que puedan ver lo que nosotros observamos a través de esa lente y saquen sus propias conclusiones sobre el estado del mundo y las posibilidades para el futuro.

La estructura de este libro sigue la lógica de nuestro análisis del sistema global. No son necesarias las altas matemáticas para comprenderlo, como tampoco es necesario ser un experto en informática. Ya hemos dicho que el *sobrepasamiento* se deriva de la combinación de cambio rápido, límites o barreras a dicho cambio, e imperfecciones de las señales sobre o las respuestas a esos límites. Examinaremos la situación global en ese orden: primero, el cambio global; luego, los límites planetarios; posteriormente, las formas en que la sociedad humana aprende sobre y responde a los límites.

Ilustración 1-1 POBLACIÓN MUNDIAL

Miles de millones de personas



La población mundial ha crecido exponencialmente desde el comienzo de la Revolución Industrial. En 1991 la tasa de crecimiento de la población del mundo fue estimada en el 1,7%, correspondiente a un periodo de duplicación de cuarenta años. (Fuentes: *Naciones Unidas*; *D. J. Bogue*).

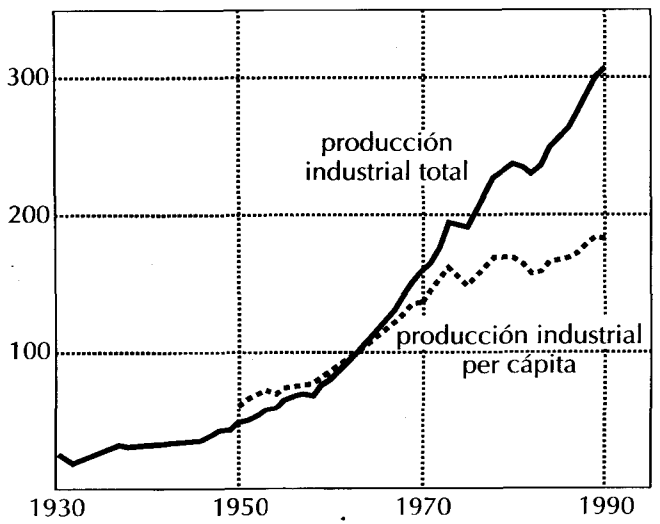
Comenzamos en el siguiente capítulo con el cambio rápido, que en el sistema global deviene básicamente del crecimiento de la población y la economía. El crecimiento ha sido el comportamiento dominante del sistema socieconómico durante más de doscientos años. Por ejemplo, en la ilustración 1-1 se muestra el crecimiento de la población mundial, que continúa ascendiendo en forma cada vez más acelerada, pese a la caída de la tasa de natalidad en algunos países.

También crece la producción industrial, como demuestra la ilustración 1-2, a un ritmo más rápido aún que la población, a pesar de algunas caídas en las épocas de mayor incremento en los precios de los combustibles. La producción industrial ha crecido un poco más rápidamente que la población, con el resultado de una lenta e irregular mejoría en las condiciones materiales normales de existencia de la población.

Igualmente, han crecido diversas formas de contaminación. La ilustración 1-3 muestra sólo una, el incremento de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre, resultado de la combustión de carburantes fósiles y de la deforestación.

Ilustración 1-2 PRODUCCIÓN INDUSTRIAL MUNDIAL

Índice (1963 = 100)



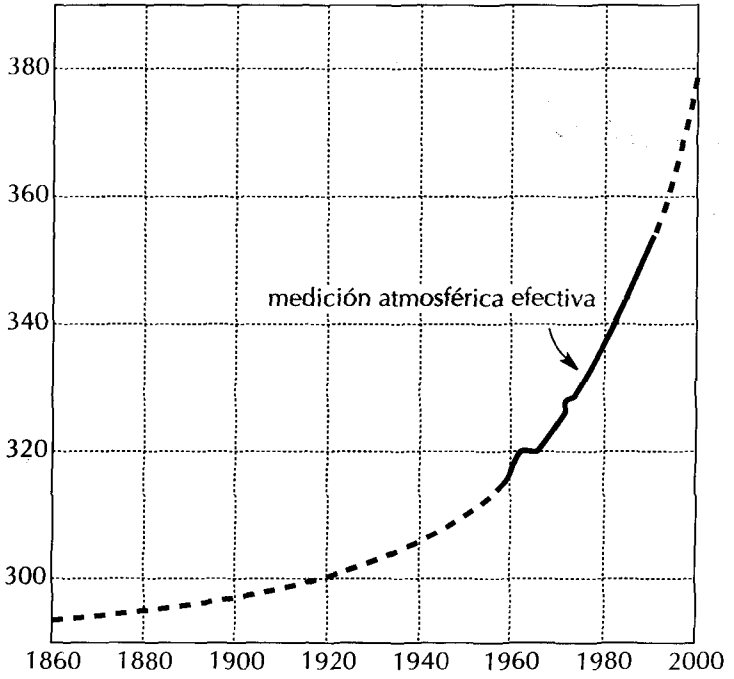
La producción industrial mundial, a partir de 1963, muestra también un claro crecimiento exponencial, pese a las fluctuaciones provocadas por los bruscos incrementos del precio del petróleo. La tasa de crecimiento 1970/1990 en la producción total arroja un promedio del 3,3% anual. La tasa de crecimiento *per cápita* ha sido del 1,5% anual. (Fuentes: *Naciones Unidas*; *Population Reference Bureau*).

Otros gráficos a lo largo de este libro ponen de manifiesto el crecimiento en la utilización de fertilizantes, en las ciudades, en el consumo de energía, en el uso de materiales, y en muchas otras manifestaciones físicas de la actividad humana sobre el planeta. No todo crece al mismo ritmo. El ritmo de incremento del consumo de petróleo en el mundo se ha desacelerado, por ejemplo, mientras que la tasa de incremento en la utilización de gas natural se ha acelerado. En el cuadro 1-A se muestran sólo algunos de los cambios materiales de los últimos veinte años. Como puede verse, el aumento del crecimiento varía, pero el crecimiento continúa siendo el patrón dominante.

El predominio del crecimiento en la actividad humana no es un descubrimiento sorprendente. En realidad, la mayoría de las personas lo consideran algo digno de celebrarse. La mayoría de las sociedades, ricas o pobres, buscan alguna forma de expansión como remedio para sus problemas más importantes e inmediatos. En el mundo rico se cree en la necesidad del crecimiento para el empleo, la movilidad social y el progreso técnico. En el mundo pobre el crecimiento eco-

Ilustración 1-3 CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA

Partes por millón y por volumen



La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se ha elevado desde aproximadamente unas 290 partes por millón en el último siglo hasta unas 350 partes por millón, y continúa su crecimiento exponencial. Las fuentes del crecimiento de dióxido de carbono son la combustión humana de carburantes fósiles y la deforestación. Las consecuencias posibles son un cambio global del clima. (Fuentes: *L. Machta*; *T. A. Boden*).

nómico se presenta como la única alternativa para salir de la pobreza. Y una familia pobre considera que una descendencia cuantiosa puede ser no sólo una fuente de alegría, sino también la esperanza de una mayor seguridad económica. Hasta que se encuentren otras soluciones para los verdaderos problemas del mundo, la gente se colgará de la idea de que el crecimiento es la clave de un futuro mejor, y hará todo lo que esté a su alcance para lograr un mayor crecimiento.

Ésas son las razones psicológicas e institucionales para el crecimiento. También hay razones estructurales, insertadas en las conexiones mismas que mantienen unidas a población y economía. En el capítulo 2 se detallan y anali-

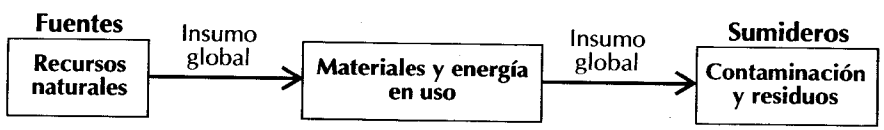
Cuadro 1-1 CRECIMIENTO MUNDIAL DE ACTIVIDADES HUMANAS SELECCIONADAS Y PRODUCTOS 1970-1990

	1970	1990
Población humana	3.600 millones	5.300 millones
Automóviles registrados	250 millones	560 millones
Kilómetros/año (sólo países OCDE)		
transporte de pasajeros.	2,584 billones	4,489 billones
camiones	666.000 millones	1,536 billones
Petróleo (consumo anual en barriles)	17.000 millones	24.000 millones
Consumo anual de gas natural en pies cúbicos	31 billones	70 billones
Consumo anual de carbón en toneladas	2.300 millones	5.200 millones
Capacidad de generación eléctrica en kilovatios	1.100 millones	2.600 millones
Generación anual de electricidad por nucleares	9 teravatios/hora	1.884 teravatios/hora
Consumo anual de gaseosas (EE UU) en barriles	150 millones	364 millones
Consumo anual de cerveza (EE UU) en barriles	125 millones	187 millones
Utilización anual de aluminio para envases de gaseosas y cervezas (EE UU)	72.700 ton.	1.251.900 ton.
Basura municipal generada al año (sólo OCDE) en toneladas	302 millones	420 millones

zan estas causas estructurales del crecimiento, sus implicaciones, por qué el crecimiento es hasta tal punto un comportamiento dominante del sistema mundial, y por qué el crecimiento resuelve sólo en forma ineficaz, si es que los resuelve en alguna medida, los problemas que se supone que debería enmendar.

El crecimiento puede resolver algunos problemas, pero crea a su vez otros. Esto se debe a la existencia de los límites, objeto del capítulo 3.

La tierra es finita. El crecimiento de cualquier objeto físico, incluyendo la población humana, sus coches, sus edificios y sus chimeneas, no puede continuar indefinidamente. Pero los límites importantes al crecimiento no son los límites a la población, los coches, edificios o chimeneas, al menos no directamente. Son los límites al volumen global de insumos —los flujos de energía y materiales necesarios para mantener a la gente, los coches, los edificios y las chimeneas funcionando.



La población humana y la economía dependen de los flujos constantes de aire, agua, alimentos, materias primas y combustibles fósiles de la tierra. Emiten constantemente desperdicios y contaminación que vuelve a la tierra. Los límites del crecimiento son los límites de la habilidad de las *fuentes* planetarias para proveer ese flujo de materiales y energía, y los límites de los *sumideros* planetarios para absorber la contaminación y los residuos.

En el capítulo 3 examinamos, a través de los datos estadísticos globales, las condiciones de las fuentes y sumideros de la tierra. La conclusión de dicho capítulo destaca dos hechos, que constituyen la clásica combinación de malas noticias/buenas noticias.

Las malas noticias son que muchas fuentes cruciales están disminuyendo y degradándose, y que muchos sumideros están desbordándose. Los flujos de insumos globales que sostienen la economía humana no pueden mantenerse en su tasa actual de forma indefinida, y en algunos casos por poco tiempo más. Las buenas noticias son que las altas tasas actuales de insumos globales no son necesarias para mantener un nivel de vida decente para toda la población mundial. Actualmente existen y son posibles cambios técnicos y una mayor eficiencia, que pueden ayudar a mantener la producción final de bienes y servicios mientras reducen en forma sensible la carga sobre el planeta. Hay muchas posibilidades, muchas formas de traer de vuelta a la humanidad desde más allá de los límites de la explotación de los insumos globales.

Pero ése no es el final de la historia. Esas posibilidades no se están realizando, al menos no con la suficiente rapidez como para que se logre un resultado a corto plazo. No se realizan porque no hay una razón obvia o inmediata para realizarlas. Ese tema se desarrolla en el capítulo 4, que estudia las señales que advierten a la sociedad humana de su condición de *sobrepasamiento* y la velocidad con la que la sociedad puede responder.

En el capítulo 4 se utiliza el modelo informático World3. Describimos la finalidad, la estructura, y el comportamiento de World3. Mostramos qué es lo que ocurre cuando usamos el modelo para simular el sistema mundial tal como podría evolucionar si no se registran cambios estructurales, ni esfuerzos extraordinarios para pronosticar, ni mejoría de la señalización, ni resolución de los problemas antes de que se hagan críticos. El resultado de dichas simulaciones es no sólo el *sobrepasamiento*, sino el colapso.

Afortunadamente hay evidencia de que el mundo humano real es más competente que el modelo mundial simplificado del capítulo 4. En el capítulo 5 se relata la mejor historia que conocemos sobre la habilidad humana para prever el futuro, palpar los límites y retirarse. Describimos la respuesta mundial actual a las noticias del deterioro de la capa de ozono. La historia es importante, pensamos, por varias razones. En primer lugar, y lo más importante, ofrece esperanzas. En segundo lugar, ilustra cada uno de los puntos estructurales que hemos descrito sobre el sistema global: crecimiento rápido, límites, respuesta lenta (tanto en el sistema político como en el sistema natural) y *sobrepasamiento*. En tercer lugar, la conclusión de la historia no está aún clara y no lo estará durante décadas, motivo por el que resulta un relato aleccionador, una forma de ilustrar cuán traicionero es guiar la compleja economía humana a través del todavía más complejo sistema del planeta con una comprensión imperfecta, falta de visión y fuerte inercia.

En el capítulo 6 volvemos al modelo World3 y comenzamos a construir en él varias hipótesis sobre la inteligencia humana. Nos concentramos en ese capítulo en las formas del saber en las que mucha gente

tiene depositada una gran fe: tecnología y mercados. Rasgos importantes de estas dos significativas capacidades de respuesta humana ya están incluidos en el World3, pero en el capítulo 6 los reforzamos. Nos preguntamos: ¿Qué ocurriría si la sociedad mundial comenzara a asignar sus recursos seriamente al control de la contaminación, conservación de la tierra, salud humana, reciclado de materiales y eficacia en el uso de los recursos?

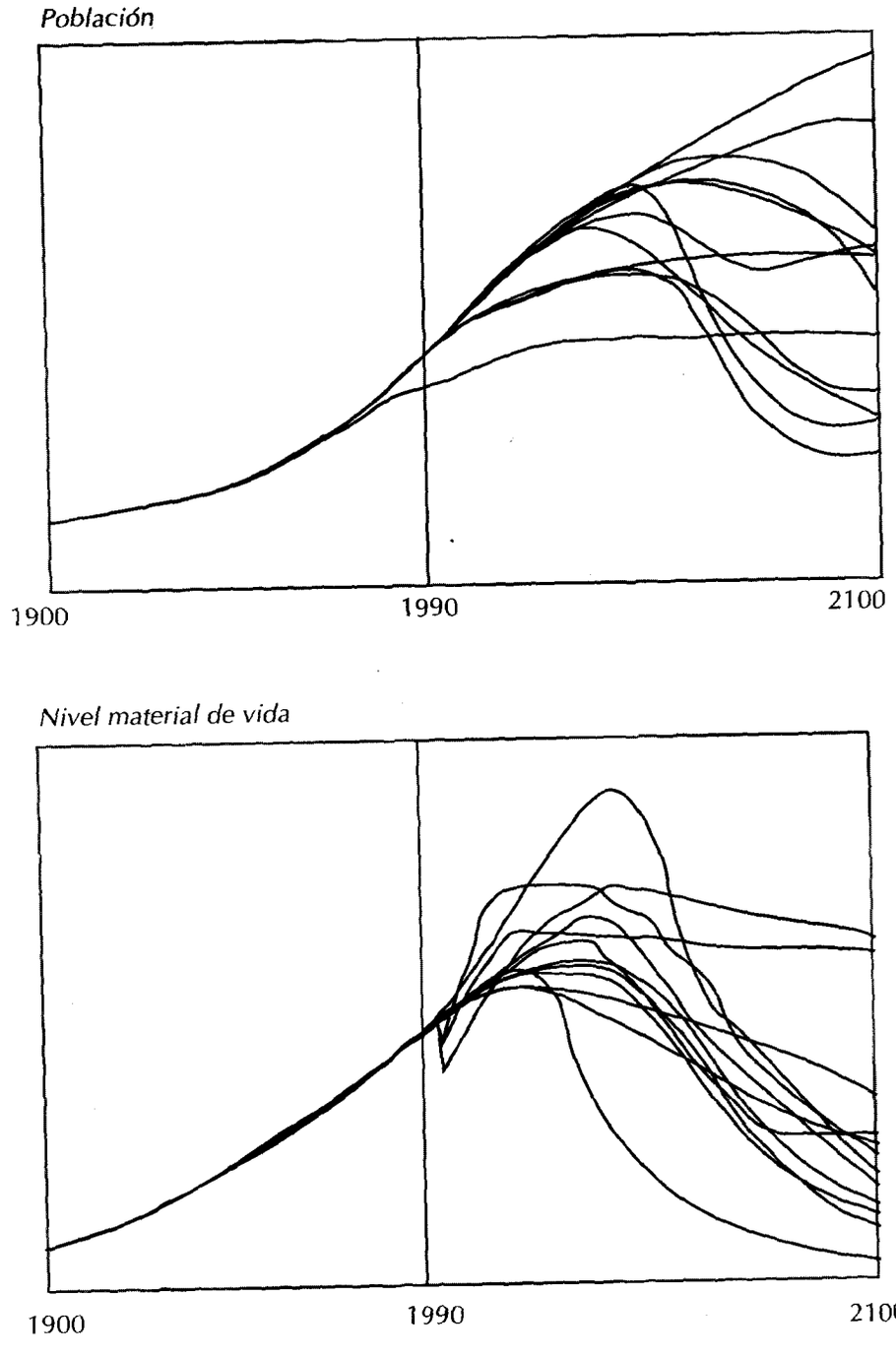
Descubrimos que estas medidas ayudan considerablemente. Pero no son suficientes. No alcanzan porque las respuestas tecnológicas y de mercado son lentas e imperfectas. Llevan tiempo, demandan capital, requieren flujos energéticos y materiales para sostenerse, y pueden ser desbordadas por los cambios incesantes que promueve el crecimiento. El progreso tecnológico y la flexibilidad del mercado serán necesarios, creemos, para llevar al mundo hacia la sostenibilidad. Pero se requiere algo más. Ése es el tema del capítulo 7.

En el capítulo 7 se usa el World3 para descubrir qué ocurre si los seres humanos complementan su habilidad con la sabiduría. Asumimos dos definiciones de "suficiente": una tiene que ver con el consumo de bienes materiales; la otra, con el tamaño deseable de la familia. Con estos cambios, combinados con los cambios técnicos que hemos asumido ya en el capítulo 6, el modelo de población mundial se estabiliza en unos 8.000 millones de personas. Todos esos 8.000 millones logran un nivel de bienestar material equivalente a grandes rasgos al de los habitantes actuales de Europa. Y, dando por sentados ciertos razonables avances futuros en la eficiencia del mercado y de la tecnología, los insumos globales materiales necesitados por ese sistema pueden ser mantenidos en forma indefinida por el planeta. En esta simulación, el *sobrepasamiento* es transformado en sostenibilidad.

Ilustración 1-4 PROYECCIONES ALTERNATIVAS PARA LA POBLACIÓN GLOBAL Y BIENES DE CONSUMO PER CÁPITA HASTA EL 2100

Esta ilustración superpone todos los escenarios del World3 que aparecen en este libro, para ilustrar la amplia gama de posibles pasos para dos importantes variables, la población y los bienes de consumo *per cápita*. Algunos escenarios muestran declinaciones; otros caracterizan a una sociedad que ha logrado una población estable con un alto y sostenible estándar de vida.

ILUSTRACIÓN 1-4



El concepto de sostenibilidad es tan ajeno al mundo contemporáneo acostumbrado al crecimiento, que nos tomamos algún tiempo en el capítulo 7 para definirlo y explicitar cómo puede ser —y qué es lo que no puede ser— un mundo de sostenibilidad. No vemos motivo alguno para que un mundo sostenible deje a nadie en la pobreza. Muy por el contrario, pensamos que un mundo de este tipo tendría tanto la oportunidad como la necesidad de proveer seguridad material a todos sus habitantes y a niveles más altos que los que se disfrutan en la actualidad. No creemos que una sociedad sostenible deba vivir en el estancamiento, ser aburrida, fija o inadaptada. No tiene por qué ser controlada de forma rígida, centralizada, uniforme, monolítica o antidemocrática. Lo que puede ser es un mundo con tiempo y recursos para corregir sus errores, para innovar y para desarrollarse sin crecer más allá de sus límites.

El último capítulo se deriva más de nuestros modelos mentales que de los datos o del modelo informático; es nuestro intento personal de dar una visión del estado sostenible e imaginar cómo llegar desde aquí hasta allí. Sabemos que ésa será una tarea compleja. De hecho creemos que será una revolución tan profunda como las revoluciones agrícola e industrial. Apreciamos la dificultad que supone encontrar soluciones sostenibles a problemas como la pobreza o el desempleo, para los que el crecimiento ha sido, hasta ahora, la única esperanza mundial. Pero también sabemos que el crecimiento no está desempeñando una labor eficaz para resolver estos problemas, que en cualquier caso el crecimiento no es sostenible, y que se pueden encontrar otras soluciones.

Todo lo que hemos aprendido de los datos globales, del ordenador y de nuestra propia experiencia, nos habla del acortamiento de los posibles pasos hacia el futuro durante los últimos veinte años en la medida que la sociedad humana ha ido desarrollándose más allá de sus límites.

Hay todavía, sin embargo, muchas elecciones, y esas elecciones son cruciales. La ilustración 1-4 muestra la enorme gama de posibilidades. El gráfico se ha derivado de la superposición de curvas para la población humana y bienes de consumo *per cápita* generados por todos los escenarios de ordenador que se presentan luego en el libro.

Muestra una gran variedad de pasos futuros. Incluye varios tipos de colapsos, y también transiciones suaves hacia estados más o menos sostenibles. No incluye el crecimiento continuo. Las elecciones consisten en llevar el peso de las actividades humanas sobre la tierra hasta un nivel sostenible por decisión humana, tecnología humana y organización humana,

o dejar que sea la naturaleza la que fuerce la reducción a través de la falta de alimentos, energía y materiales o por la existencia de un medio ambiente cada vez menos sano.

Hace veinte años, cuando escribimos *Los límites del crecimiento*, comenzamos citando a U Thant, quien era entonces secretario general de Naciones Unidas:

> No pretendo parecer excesivamente dramático, pero sólo puedo concluir, a partir de la información de que dispongo como secretario general, que los miembros de las Naciones Unidas disponen quizá de sólo diez años para subordinar sus viejas rencillas y crear una asociación global para reducir la carrera armamentista, mejorar el medio ambiente, frenar la explosión demográfica y dar el necesario empuje a los esfuerzos de desarrollo. Si no se forja una asociación de este tipo dentro de la próxima década, mucho me temo que los problemas que he mencionado puedan haber alcanzado tales proporciones que no esté a nuestro alcance ya controlarlos.

Quizá, pensamos mientras preparábamos esta segunda parte veinte años después, debiéramos sustituir esa cita por una visión más reciente y positiva, como ésta de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo:

> La humanidad tiene la capacidad de hacer sostenible el desarrollo: asegurar que hace frente a las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para hacer frente a sus propias necesidades[9].

Pero luego lo volvimos a pensar. Quizá U Thant tuviera razón. Quizá fue prematuro, y la época que le da realmente la razón es ésta. O quizá el mejor resumen de la era presente es la yuxtaposición de ambas citas.

Entre ambas recogen, de acuerdo con nuestro análisis y juicio, la enorme gama de posibilidades futuras y la importancia de las elecciones que están aún por hacer.

Capítulo 2:

LA FUERZA MOTRIZ: CRECIMIENTO EXPONENCIAL

He descubierto, para horror mío, que no he sido inmune a la ingenuidad acerca de las funciones exponenciales...
Aunque he sido consciente de que los problemas interrelacionados de pérdida de diversidad biológica, deforestación tropical, sequía de los bosques en el hemisferio norte y cambios climáticos crecen exponencialmente, creo que sólo este mismo año he realmente comprendido cuán rápidamente acelerada es su amenaza.

THOMAS E. LOVEJOY[10]

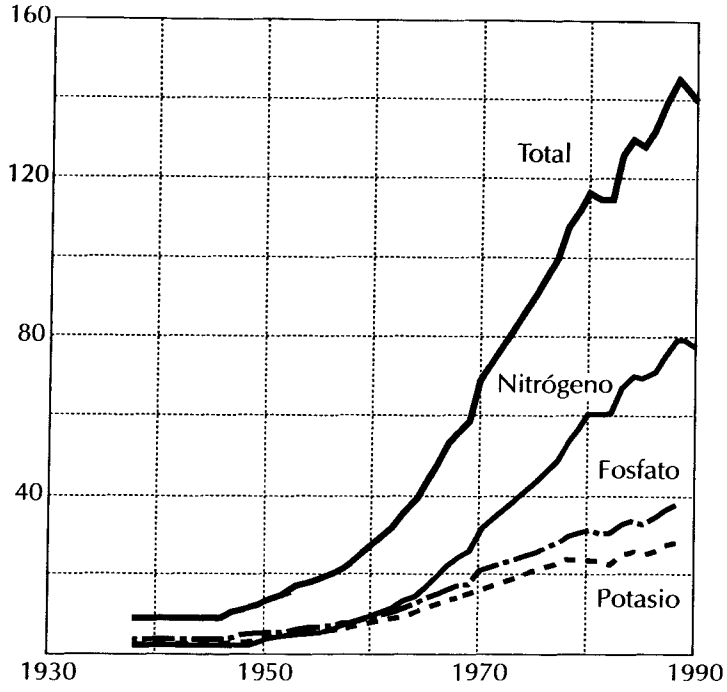
La primera causa de *sobrepasamiento* es el movimiento rápido, el crecimiento, el cambio. En el sistema global, la población, la producción de alimentos, la producción industrial, el consumo de recursos y la contaminación están creciendo. Por añadidura, crecen en forma cada vez más rápida. Su incremento sigue un patrón que los matemáticos denominan *crecimiento exponencial*.

La aproximación a muchas actividades humanas, desde el uso de fertilizantes hasta la expansión de las ciudades, puede hacerse mediante las curvas de crecimiento exponencial (ver ilustraciones 2-1 y 2-2). Las curvas pueden verse interrumpidas por fluctuaciones climáticas o económicas, cambios técnicos o convulsiones civiles, pero, en general, el crecimiento exponencial ha sido un rasgo destacado y habitualmente bien recibido de la actividad humana desde la revolución industrial.

El crecimiento exponencial es la fuerza motriz que impulsa a la economía humana a traspasar los límites físicos de la tierra. Está culturalmente engranado y es estructuralmente inherente al sistema global, y la estructura causal que lo produce está en el núcleo del modelo World3. En consecuencia debemos empezar por comprender sus matemáticas, sus causas, su forma de desenvolverse en el tiempo.

Ilustración 2-1 CONSUMO MUNDIAL DE FERTILIZANTES

Millones de toneladas métricas por año



El consumo mundial de fertilizantes crece en forma exponencial con un periodo estimado de duplicación de una década antes de 1970, y de 15 años después de 1970. El uso total es ahora 15 veces mayor que al final de la Segunda Guerra Mundial. (Fuente: *Naciones Unidas*).

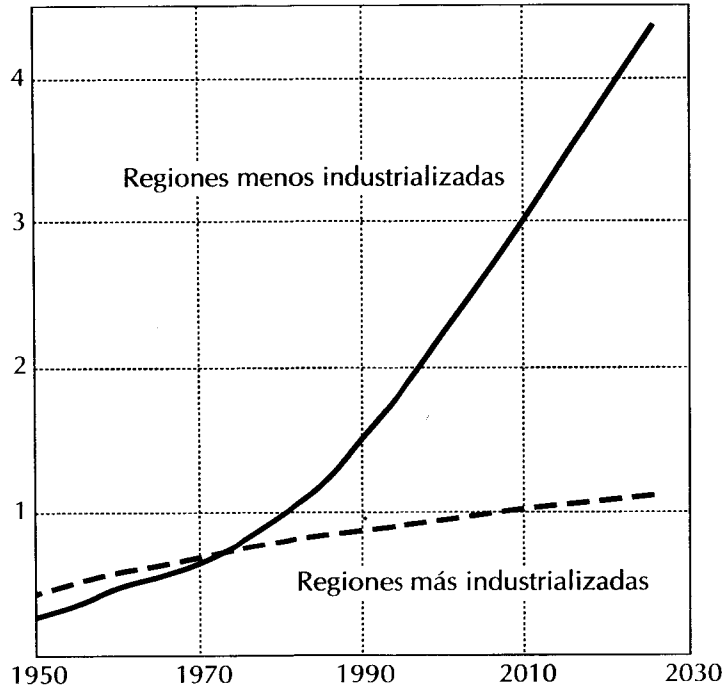
Las matemáticas del crecimiento exponencial

Tome un trozo de papel y dóblelo por la mitad. Ha duplicado su espesor. Dóblelo por la mitad una vez más para lograr que tenga un espesor cuatro veces mayor que al principio. Suponiendo que pudiera continuar doblando el trozo de papel hasta 40 veces, ¿qué grosor cree que acabaría teniendo? ¿Menos de un metro? ¿Entre uno y 10 metros? ¿Entre 10 y 1.000 metros?

En realidad no podría doblar un trozo de papel 40 veces, pero si de alguna manera pudiera doblarse su espesor 40 veces, podría hacerse una pila de papel lo suficientemente alta como para llegar desde la Tierra hasta la Luna[11].

Ilustración 2-2 POBLACIÓN URBANA MUNDIAL

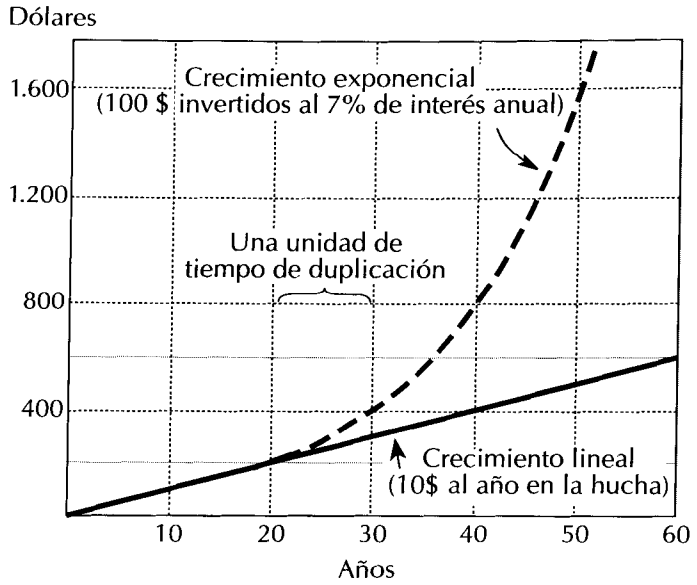
Miles de millones de personas



Se espera que la población urbana total crezca exponencialmente en las regiones menos industrializadas del mundo, pero en forma casi lineal en las regiones más industrializadas. El periodo promedio de duplicación de la población urbana en las naciones menos industrializadas ha sido de 20 años —más rápido que el crecimiento de la población en su conjunto. (Fuentes: *Naciones Unidas*; *Population Reference Bureau*).

Eso es el crecimiento exponencial: duplicación, reduplicación y nueva duplicación. Casi todo el mundo se sorprende por este fenómeno, porque la mayoría de la gente piensa en forma lineal y piensa en el crecimiento como un fenómeno lineal. Una cantidad crece en forma lineal cuando se incrementa en cantidades constantes durante un periodo determinado de tiempo. Si una cuadrilla de trabajadores construye un kilómetro de autopista en una semana, el crecimiento de la carretera será lineal. Si un niño pone en su hucha 10 pesetas al año, sus ahorros crecen en forma lineal. En el incremento lineal la tasa de crecimiento es constante en un tiempo dado. No se ve afectada por la longitud de la carretera que ya ha sido construida o por la cantidad de dinero que ya hay en la hucha.

Ilustración 2-3 CRECIMIENTO LINEAL DEL AHORRO COMPARADO CON SU CRECIMIENTO EXPONENCIAL



Si un niño ingresa en su hucha 10 pesetas al año, sus ahorros crecerán en forma lineal, como se refleja en la línea inferior. Si, a partir del año 10, el niño invierte 100 pesetas al 7% de interés anual, esas 100 pesetas crecerán en forma exponencial, con un periodo de duplicación de 10 años.

Una cantidad crece exponencialmente cuando su incremento es proporcional a lo que ya existía. Una colonia de células de levadura en la que cada célula se duplica cada 10 minutos crece exponencialmente. Por cada célula, a cada 10 minutos habrá dos células. Tras otros 10 minutos habrá cuatro células, 10 minutos después habrá ocho, luego 16 y así sucesivamente. Cuantas más células de levadura haya, mayor será la cantidad de nuevas células cada 10 minutos.

Si el niño ha invertido 100 pesetas al 7% de interés anual (dejando acumular el interés rendido en la cuenta), el dinero invertido crecerá exponencialmente. Crecerá mucho más rápido en el largo plazo de lo que lo haría el crecimiento lineal del dinero en la hucha (ver ilustración 2-3). El interés del primer año será el 7% de 100 pesetas, es decir 7 pesetas, totalizando 107 pesetas en la cuenta. El año siguiente el interés será el 7% de 107 pesetas, es decir 7,49 pesetas, llevando el total en la cuenta a 114,49 pesetas. Un año más tarde el interés sobre esta cantidad será de

8,01 pesetas, y el total alcanzará a 122,50. Al décimo año la cuenta habrá alcanzado un total de 201,37 pesetas. Y así sucesivamente.

El porcentaje añadido anualmente a la cuenta bancaria, o a cada 10 minutos a la colonia de levadura, es constante, pero no lo es la cantidad añadida. Se hace cada vez más grande a medida que la acumulación total de dinero o levadura se incrementa.

Las consecuencias sorprendentes del crecimiento exponencial han fascinado a los pueblos durante siglos. Hay una antigua leyenda persa sobre un cortesano que ofrendó a su rey un bello tablero de ajedrez y le solicitó a su señor que le diera a cambio un grano de arroz por el primer cuadro, dos granos por el segundo, cuatro por el tercero, y así sucesivamente.

El rey aceptó en seguida y ordenó que el arroz fuese traído desde sus silos. El cuarto cuadro del tablero suponía ocho granos, el décimo cuadro requería 512 granos, el decimoquinto 16.384 granos y el vigesimoprimero rendía más de un millón de granos de arroz. Al llegar al cuadragésimo, la magnitud de granos de arroz era ya de un billón. El pago solicitado por el cortesano jamás podría haberse cumplido porque suponía más arroz que el que podía haber en el mundo.

Hay un problema infantil francés que ilustra adecuadamente otra peculiaridad del crecimiento exponencial: la naturaleza aparentemente repentina con la que una cantidad en crecimiento exponencial alcanza un límite fijo. Suponga que es propietario de un estanque en el que crece un nenúfar. La planta duplica su tamaño cada día. Si se permitiera a la planta crecer sin limitaciones, cubriría completamente el estanque en el plazo de 30 días, ahogando a cualquier otra forma de vida en el agua. Durante un largo plazo de tiempo la planta parece pequeña, por lo que uno no se preocupa por ella hasta que cubre la mitad del estanque. ¿Qué día ocurrirá eso?

El vigesimonoveno. Lo cual le deja un solo día para intentar salvar su estanque[12]. (El vigesimoquinto día la planta sólo cubre 1/32 del estanque; el vigesimoprimero cubre sólo 1/512 del estanque. Durante la mayor parte del mes la planta, aunque se duplica en forma permanente, es invisible o no sugiere consecuencias. Se puede ver en este simple ejemplo cómo el crecimiento exponencial, sumado a la falta de atención, ¡puede desembocar en el *sobrepasamiento*!).

Una cantidad que crece de acuerdo con los términos de una ecuación exponencial se duplica una y otra vez, y cada duplicación demanda el mismo tiempo que la anterior. En el caso del nenúfar el periodo de duplicación es de un día. El dinero invertido en el banco al 7% de interés se duplicará cada diez años. Hay una relación simple entre el tipo de interés, o la tasa de crecimiento en términos porcentuales, y el tiempo que tardará una

cantidad en duplicarse. El tiempo de duplicación es igual a 70 dividido por la tasa de crecimiento, como queda reflejado en el cuadro 2-1.

Cuadro 2-1 PERIODOS DE DUPLICACIÓN

Tasa de crecimiento (% anual)	periodo de duplicación (en años)
0,1	700
0,5	140
1,0	70
2,0	35
3,0	23
4,0	18
5,0	14
7,0	10
10,0	7

He aquí un ejemplo hipotético de cómo funciona el tiempo de duplicación. Nigeria tenía en 1990 una población de 118 millones, y la tasa de crecimiento de su población era del 2,9% anual. El periodo de duplicación es de 70 dividido por 2,9: 24 años. Si su actual tasa de crecimiento se mantuviera sin variar en el futuro, la población de Nigeria seguiría un patrón como el ilustrado en el cuadro 2-2.

Cuadro 2-2 POBLACIÓN DE NIGERIA CON UN CRECIMIENTO EXPONENCIAL CONTINUADO

Año	Población (millones)
1990	118
2014	236
2038	472
2062	944
2086	1.888

Un niño nigeriano nacido en 1990 y que viva 70 años vería a la población de su país multiplicarse por ocho. Cerca del fin del próximo siglo habría más de 1.800 millones de nigerianos, 16 por cada uno de 1990. Para el año 2086 habría en Nigeria casi tres veces más habitantes que en todo el continente africano en 1990.

La única razón para hacer un cálculo de este tipo es convencerse de que semejante futuro nunca podría hacerse realidad. El crecimiento exponencial simplemente no puede proseguir y no proseguirá por mucho tiempo más.

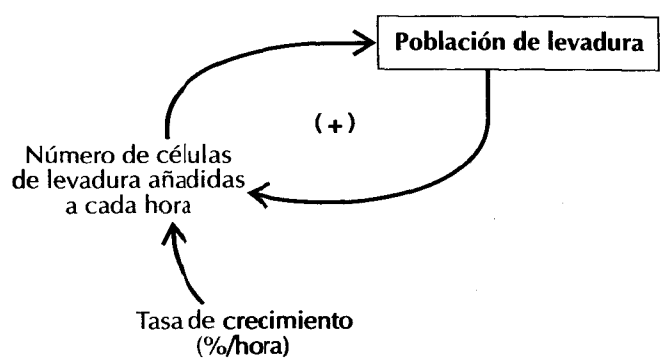
La pregunta razonable es por qué se mantiene mientras tanto, y qué es lo que con mayor probabilidad lo puede detener.

Cosas que crecen exponencialmente

El crecimiento exponencial se produce por una de estas dos razones: porque una entidad que crece se reproduce a sí misma desde sí misma, o porque una entidad que crece es empujada por algo que se reproduce a sí mismo desde sí mismo.

Todas las criaturas vivientes, desde las bacterias hasta las personas, se encuentran en la primera categoría. Nuevas criaturas surgen de otras criaturas. Cuantas más criaturas haya, más nuevas criaturas pueden generarse.

Ilustramos la estructura del sistema de una población que se autorreproduce con un diagrama como el que sigue:



El recuadro sobre la población de levadura indica que se trata de un *stock* —una acumulación de levadura, resultado de multiplicaciones pasadas—. Las flechas indican causalidad o influencia, que pueden ejercerse en

muchos sentidos. En este diagrama la flecha superior quiere decir que nueva levadura fluye para incrementar el *stock* inicial. La flecha inferior significa que el tamaño del *stock* gobierna la generación de nueva levadura. Cuanto más grande la población, mayor será la cantidad de nuevas células que se generen, mientras no ocurra nada que impida esta generación.

El signo (+) en el centro del bucle significa que las dos flechas juntas conforman un *círculo de retroalimentación positiva*. Un círculo de retroalimentación positiva es una cadena de relaciones causa-efecto que se cierra sobre sí misma de forma tal que un cambio en cualquiera de los elementos del círculo modificará aún más el elemento original en la misma dirección. Un incremento ocasionará un mayor incremento; una reducción implicará una mayor reducción.

En este sentido, "positivo" no significa necesariamente "bueno". Se refiere simplemente a la dirección de refuerzo de la influencia causal sobre el bucle. (De modo similar, los bucles de retroalimentación negativa, que se verán en un momento, no son necesariamente malos. De hecho, a menudo son estabilizadores. Son negativos en el sentido de que contrarrestan o modifican en sentido opuesto las influencias causales alrededor del círculo).

Un círculo de retroalimentación positiva puede ser un "círculo virtuoso" o un "círculo vicioso", dependiendo de que el tipo de crecimiento que ocasiona sea deseado o no. La retroalimentación positiva causa el crecimiento exponencial de la levadura en el pan, de un brote de peste en una cosecha agrícola, o del dinero en una cuenta bancaria con interés. Toda vez que un círculo de retroalimentación positiva está presente en un sistema, el sistema tiene el potencial de producir crecimiento exponencial o declinación exponencial.

La presencia de un círculo de crecimiento positivo no implica que una población de levadura, gente, plaga, o dinero, deba crecer necesariamente en forma exponencial; sólo quiere decir que tiene la capacidad estructural de hacerlo. La tasa de crecimiento real se verá influida por muchas cosas, como los nutrientes (en el caso de la levadura), la tasa de interés (en el caso del dinero), la temperatura y la presencia de otras poblaciones (en el caso de las plagas), y, en el caso de los seres humanos, incentivos, desincentivos, metas y objetivos. La tasa de crecimiento real puede tener una gran variación en cada sitio y época. La capacidad estructural de crecimiento de una población puede mantenerse neutralizada por factores externos o por autorrestricciones. Pero el crecimiento de la población, cuando ocurre, es exponencial, hasta que algo lo detiene.

Otra cosa que puede crecer en forma exponencial es el *capital industrial*, mediante el cual designamos las maquinarias y fábricas que generan otras maquinarias y fábricas. Una planta siderúrgica puede fabricar el acero para construir otra planta siderúrgica, una fábrica de tuercas y tornillos puede fabricar las tuercas y tornillos que se utilizan para montar otras máquinas que producen tuercas y tornillos. Más fábricas hacen posibles todavía más fábricas, en el modo interconectado, autoabastecido y de abastecimiento cruzado hacia el que ha evolucionado la economía industrial contemporánea.

No es un accidente que el mundo se haya habituado a esperar que la economía crezca un cierto porcentaje por sí misma —3% o 5% más o menos— cada año. Ésta es una expectativa de crecimiento exponencial. Y puede hacerse realidad sólo porque el capital puede crearse a sí mismo desde sí mismo, es decir, tiene la capacidad de reproducirse. Una economía crecerá exponencialmente toda vez que la capacidad de reproducción del capital no se vea constreñida por la demanda de los consumidores, por la disponibilidad de la mano de obra, por las materias primas o la energía, por la confianza de los inversores, por la incompetencia, por cualquiera de los cientos de factores que pueden limitar el funcionamiento de un complejo sistema de producción. Como la población, el capital tiene la *estructura* de sistema (un círculo de retroalimentación positiva) para producir el *comportamiento* llamado crecimiento exponencial. Pero el capital tiene otros círculos de retroalimentación que también influyen en él, y otros posibles comportamientos. Todos saben que las economías no crecen siempre. Pero tienen una fuerte tendencia hacia el crecimiento, y la mayoría de ellas crece, siempre que les sea posible.

La población y el capital son maquinarias de crecimiento en el mundo industrializado. Otras cantidades, tales como la producción de alimentos, la utilización de los recursos, o la contaminación, tienden a incrementar exponencialmente no porque se multipliquen a sí mismas, sino porque son *arrastradas* por la población y el capital. No hay autogeneración, circuito de retroalimentación positiva, que fuerce a los pesticidas en las aguas subterráneas a crear más pesticidas, o al carbón a reproducirse en el subsuelo para generar más carbón. Producir dos millones de toneladas de trigo no hace más fácil producir cuatro millones de toneladas de trigo, a menos que el proceso haya entrañado un aprendizaje o alguna innovación tecnológica. En algún punto y a medida que se alcanzan los límites,

cada duplicación de la producción de alimentos o de recursos extraídos por la minería, en lugar de hacerse más fácil, se hace más difícil que la duplicación anterior.

Por consiguiente, la utilización de recursos y energía, y la producción de alimentos, no han crecido por su propia capacidad estructural, sino porque una población en crecimiento exponencial ha estado demandando más alimentos, materiales y energía, y hasta ahora ha sido exitosa en su producción. De la misma manera, la contaminación y los residuos han crecido no a causa de sus propios procesos interiores de retroalimentación, sino porque son arrastrados por la creciente cantidad de materiales utilizados y energía consumida por la economía humana en crecimiento.

La población y el capital son capaces de crecimiento exponencial, y, a medida que crecen, demandan y facilitan el crecimiento de los insumos totales, materiales y energéticos, y la contaminación y emisión de residuos. Esto no es una suposición gratuita, es un hecho. Es un hecho estructural: los mecanismos a través de los cuales ocurre son conocidos. Es además un hecho observado: la población humana y el capital industrial, así como los flujos de insumos materiales y energía que los sostienen, han crecido vigorosamente, con sólo breves interrupciones, durante siglos.

Crecimiento de la población mundial

En el año 1650 la población humana se cifraba en torno a los 500 millones de personas. Crecía a una tasa del 0,3% anual, correspondiente a un periodo de duplicación de cerca de 250 años.

En 1900 la población había alcanzado los 1.600 millones de personas y crecía a una tasa anual del 0,5%, con un periodo de duplicación de 140 años.

En el año 1970 la población totalizaba 3.600 millones y la tasa de incremento poblacional había alcanzado el 2,1% anual. Eso no sólo era crecimiento exponencial, era superexponencial —la tasa de crecimiento crecía en sí misma. Crecía por una razón feliz: la tasa de mortandad estaba cayendo. También decrecían las tasas de natalidad, pero en forma mucho más lenta. Por lo cual la población crecía en forma acelerada.

Entre 1971 y 1991 la tasa de mortandad continuó cayendo, pero la tasa de natalidad promedio comenzó a caer más rápidamente (ilustración 2-4). Aunque la población se elevó de 3.600 millones a 5.400 millones, la tasa de crecimiento cayó del 2,1% al 1,7%[13].

Ése es un cambio significativo, pero no quiere decir que el crecimiento de la población esté más próximo a un proceso de nivelación. En realidad, fueron añadidas más personas a la población mundial en 1991 que en cualquier año antes. El cuadro 2-3 muestra por qué.

Cuadro 2-3 ADICIONES A LA POBLACIÓN MUNDIAL, 1971 Y 1991

Año	Población (en millones)	X	Tasa de crecimiento (por año)	=	Población Añadida (millones)
1971	3.600	X	2,1%	=	76
1991	5.400	X	1,7%	=	92

La tasa de crecimiento de la población no ha caído con la rapidez con que ha crecido la base de la población. Motivo por el cual la cantidad de gente incorporada cada año sigue creciendo. El crecimiento es todavía exponencial, aunque a una tasa levemente menor. Los 92 millones añadidos en 1991 equivalen a añadir en ese solo año la población total de Alemania, más Austria y Suiza —o alrededor de seis ciudades como Nueva York—, o, con mayor precisión, ya que el 90% del incremento se produjo en el Tercer Mundo, equivalen a añadir en un solo año las poblaciones totales de México y Honduras —o alrededor de ocho ciudades como Calcuta. Aun con proyecciones sumamente optimistas sobre nuevas caídas en la tasa de natalidad, nos espera un enorme incremento de la población, especialmente en las naciones menos industrializadas (ilustración 2-5).

El diagrama de la estructura central de retroalimentación que gobierna el sistema poblacional se muestra debajo.

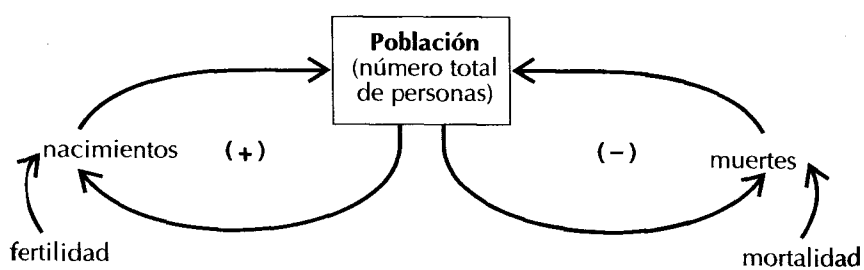
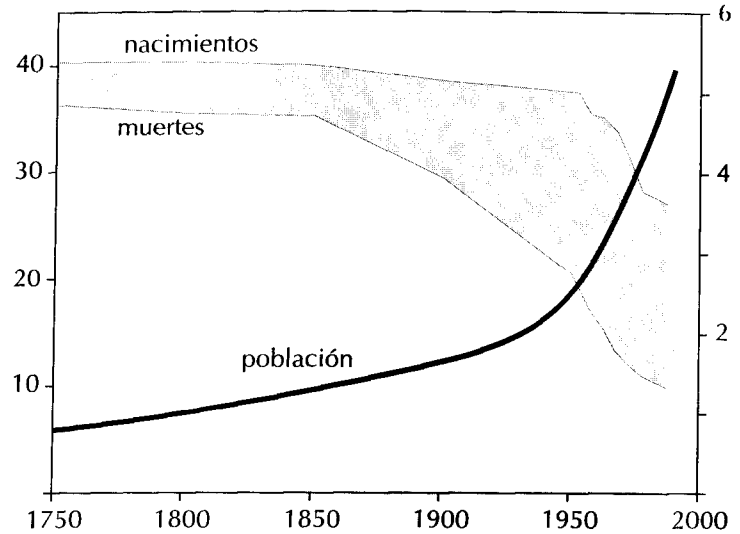


Ilustración 2.4 TRANSICIÓN DEMOGRÁFICA MUNDIAL

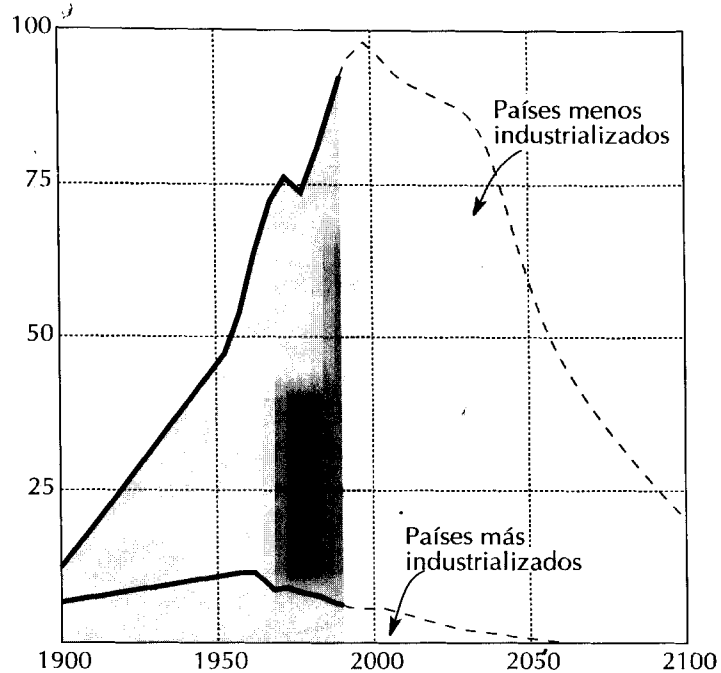


La franja sombreada entre nacimientos y muertes muestra la tasa a la que crece la población. Hasta 1970 aproximadamente, la tasa promedio de mortandad humana caía más de prisa que la tasa de natalidad, y la población seguía incrementándose. Desde 1970, la tasa promedio de natalidad ha caído un poco más rápidamente que la tasa de mortandad. Por consiguiente, la tasa de crecimiento de la población ha decrecido algo —pero el crecimiento sigue siendo exponencial. (Fuente: *Naciones Unidas*).

A la izquierda está el bucle positivo que es responsable del crecimiento exponencial. Cuanto mayor la población, mayor será la cantidad de recién nacidos cada año. Cuantos más bebés, más grande la población. Tras un lapso de retraso en el que esos bebés se transforman en padres que pueden procrear, una mayor cantidad de niños puede nacer, incrementando aún más la población.

A la derecha hay otro ciclo de retroalimentación. Éste es negativo. Así como los ciclos positivos generan un crecimiento acelerado, los ciclos con retroalimentación negativa tienden a regular el crecimiento, para mantener un sistema dentro de dimensiones tolerables o para reducirlo a un estado estable. Un bucle de retroalimentación negativa propaga las consecuencias de un cambio en un elemento alrededor del círculo hasta que dicho elemento ocasiona una modificación en dirección opuesta al cambio inicial.

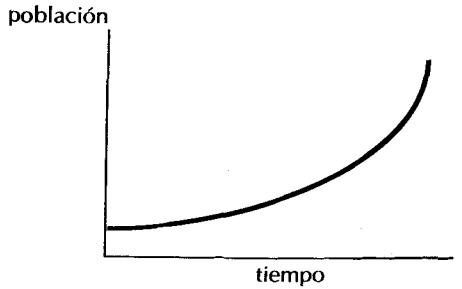
Ilustración 2-5 INCREMENTO ANUAL DE LA POBLACIÓN MUNDIAL



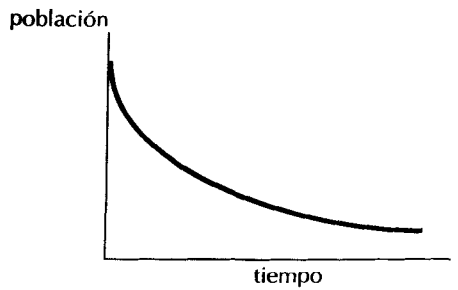
El número de personas que se añade anualmente a la población mundial ha crecido en forma enorme y las proyecciones indican que seguirá creciendo durante otra década, según las previsiones del Banco Mundial. Esas estimaciones son muy optimistas; tienen en cuenta rápidas caídas en la tasa de natalidad de las naciones menos industrializadas. (Fuentes: *Naciones Unidas*; *E. Bos et al.*).

El número de muertes cada año es igual a la población total multiplicada por la mortandad promedio —la probabilidad promedio de muerte a cada edad—. El número de nacimientos es igual a la población total por la tasa de fertilidad promedio. La tasa de crecimiento de la población es igual a su fertilidad menos su mortandad. Desde luego, la fertilidad y la mortandad humana no son constantes. Dependen de factores económicos, medioambientales y demográficos, como ingresos, educación, sistema sanitario, tecnologías de planificación familiar, religión, contaminación y estructura de edad de la población.

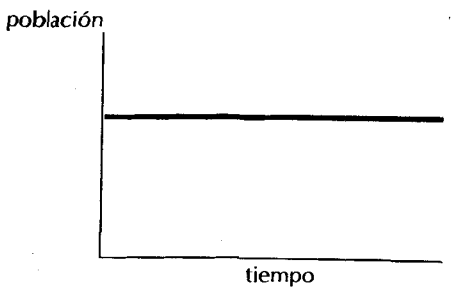
En consecuencia, los dos bucles de retroalimentación descritos antes pueden producir numerosos y diferentes comportamientos dinámicos. Si la fertilidad es más alta que la mortandad, la población crecerá en forma exponencial.



Si la mortandad es más alta que la fertilidad, la población caerá hacia el cero.



Si la fertilidad es simplemente igual a la mortandad, los nacimientos serán iguales a las muertes y el tamaño de la población permanecerá constante, pese a que habría una rotación continua, un flujo de nuevas personas reemplazando a las antiguas. Esta condición de flujo estable se denomina *equilibrio dinámico*.



Las poblaciones contemporáneas pueden reflejar cualquiera de esos comportamientos a lo largo del tiempo, y lo hacen. Las combinaciones de fertilidad y mortandad de las poblaciones humanas son tan variadas como las culturas e historias de las diversas naciones y grupos étnicos del mundo. Pero dentro de esta variedad hay unas pocas constantes:

- Algunas de las poblaciones menos industrializadas, como muchas de África, tienen todavía una muy alta mortandad y una fertilidad aún más alta. Su tasa de crecimiento anual de la población es de entre el 2% y el 3%, y puede aumentar si declina la mortandad.

- Poblaciones en un nivel intermedio de industrialización, como las de Brasil, Indonesia, Tailandia y Egipto, curiosamente tienen una baja tasa de mortandad, mientras que su tasa de fertilidad es todavía alta pero tiende a decrecer. Crecen de tasas moderadas a rápidas (1% a 4% al año).

- La mayoría de las sociedades altamente industrializadas, como las de Estados Unidos, Japón y Europa, tienen una baja mortandad, baja fertilidad, y una lenta tasa de crecimiento (menos del 1% anual). Las tasas de natalidad en algunos países europeos han caído recientemente por debajo de las tasas de mortandad, motivo por el cual dichas poblaciones muestran una muy lenta declinación.

Los demógrafos han postulado, a partir de este conjunto de patrones, una teoría denominada *transición demográfica*. De acuerdo con esta teoría, a bajos niveles de industrialización, tanto la fertilidad como la mortalidad son altas, y el crecimiento de la población es lento. A medida que mejoran los servicios sanitarios y la nutrición, caen las tasas de mortandad. Las tasas de natalidad siguen rezagadas durante una o dos generaciones, abriendo una brecha entre fertilidad y mortandad que produce un rápido crecimiento de la población. Finalmente, a medida que la vida y el estilo de vida de las personas evolucionan en un modelo plenamente industrializado, las tasas de natalidad caen también, y la tasa de crecimiento de la población vuelve a hacerse más lenta.

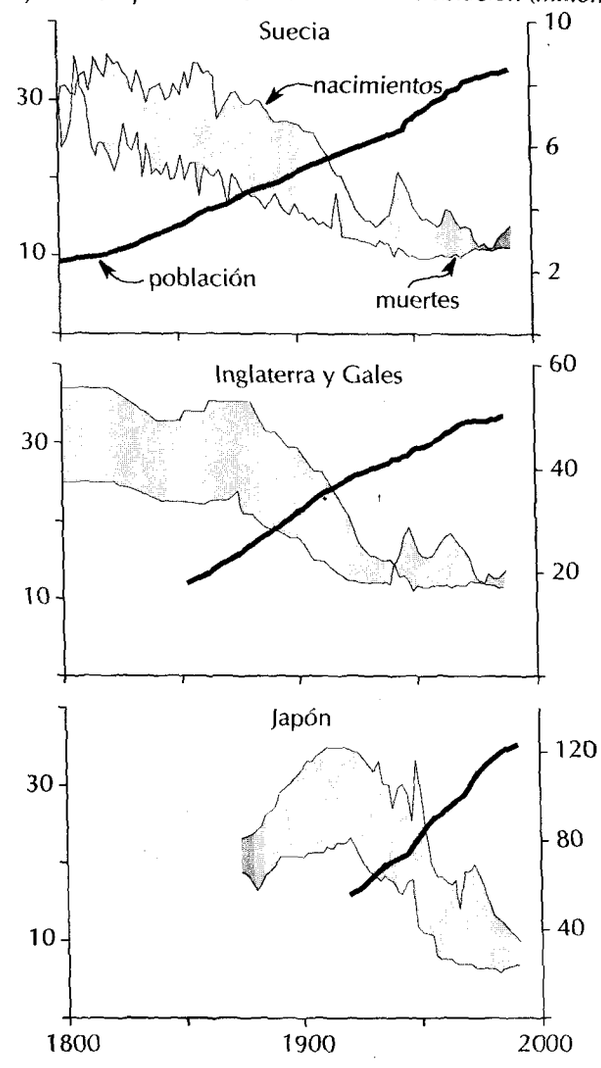
En la ilustración 2-6 se muestra el modelo de seis países. Puede verse en dichos gráficos cómo las tasas de natalidad y mortandad en las grandes naciones industrializadas, como Suecia, caen muy lentamente. La brecha entre ambas nunca fue muy grande; la población nunca creció a más de un 2% anual. Durante toda la transición demográfica, la población de la mayor parte de las naciones del Norte no creció nunca a una tasa mayor que el 5%.

En las naciones del Sur las tasas de mortandad cayeron mucho más tarde y en forma más rápida. Entre la tasa de natalidad y la de mortandad se abrió una gran brecha, y estas naciones están experimentando tasas de crecimiento de la población mucho más rápidas que cualquiera de las que hayan experimentado los países del Norte (con la excepción de Estados Unidos, que absorbió durante una temporada una fuerte corriente de inmigración europea). Las poblaciones de muchas de las actuales naciones industrializadas del Sur ya han tenido tasas de crecimiento de entre 5 y 10%, y siguen creciendo con rapidez. Sus transiciones demográficas están lejos de haber acabado, y el rápido crecimiento de la población puede ser en parte responsable de la lentitud de esas transiciones.

Los demógrafos discuten acerca de qué es lo que realmente ocasiona la transición demográfica, especialmente la dramática caída en la tasa de natalidad. La fuerza motriz es algo más complejo que los simples ingresos. La ilustración 2-7 muestra, por ejemplo, la correlación entre el Producto Interior Bruto (PIB) *per cápita* y la tasa de natalidad en varias naciones del mundo. Está absolutamente claro que hay algún tipo de relación entre la producción económica *per cápita* y la tasa de natalidad. Parece igualmente claro que hay algunas excepciones. China y Sri Lanka, por ejemplo, tienen tasas de natalidad anómalamente bajas para su nivel de ingresos. Varios países de Oriente Próximo tienen por el contrario tasas de natalidad excesivamente elevadas para ellos.

Los factores que se cree que tienen una relación directa importante en la caída de la tasa de natalidad no son tanto los niveles nacionales de ingresos medios, sino más bien el grado en que esos ingresos modifican la vida de las familias, y especialmente la vida de las mujeres. Más importantes que el PIB *per cápita* son factores tales como la educación y el empleo (especialmente para las mujeres), la planificación familiar y la reducción de la mortandad infantil. China, Sri Lanka, Costa Rica, Singapur, Tailandia, Malasia, y varias otras nacio-

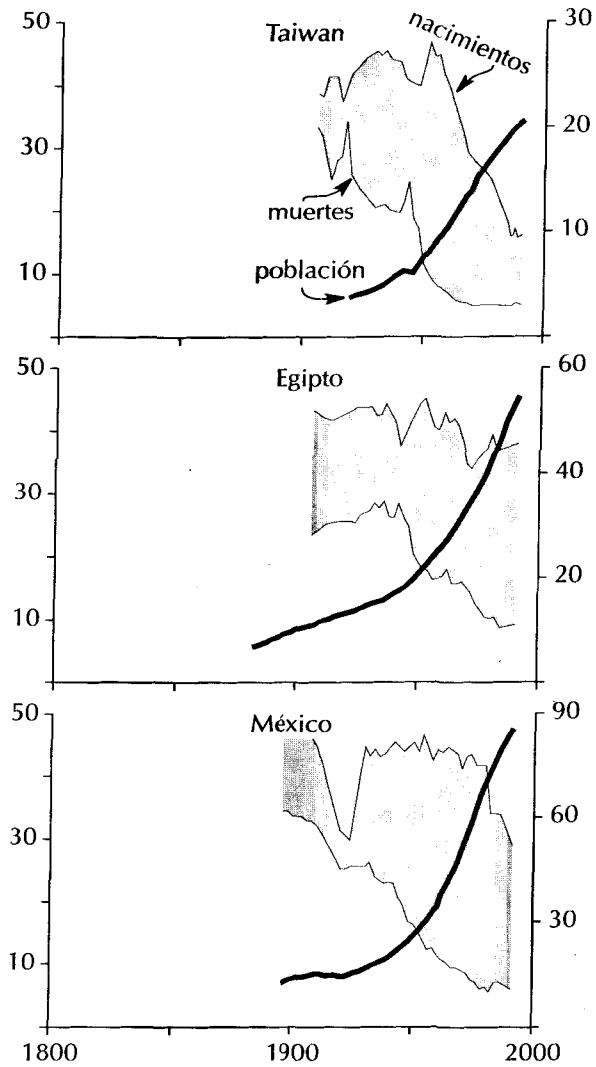
Ilustración 2-6a TRANSICIONES DEMOGRÁFICAS EN NACIONES INDUSTRIALIZADAS



En la transición demográfica primero cae la tasa de mortandad de una nación, seguida luego por su tasa de natalidad. La transición demográfica de Suecia se desarrolló hace 200 años, quedando la tasa de natalidad próxima a la tasa de mortandad. Durante este tiempo la población de Suecia creció menos de cinco veces. Japón es un ejemplo de una nación que ha sufrido dicha transición en menos de

Ilustración 2-6b TRANSICIONES DEMOGRÁFICAS EN NACIONES MENOS INDUSTRIALIZADAS

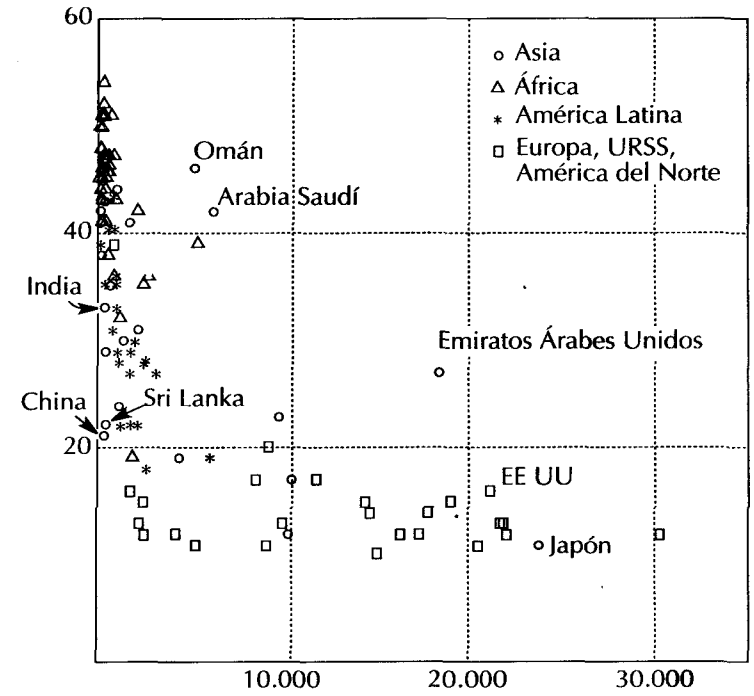
Nacimientos y muertes por 1.000 al año *Población (millones)*



un siglo. Las naciones menos industrializadas tienen menos tiempo para cumplir con este desplazamiento, y las brechas entre sus tasas de natalidad y de mortandad son más grandes que cualquiera de las que hayan prevalecido en las grandes naciones industrializadas. (Fuentes: *Naciones Unidas*; *R. A. Easterlin*; *J. Chesnais*; *N. Keyfitz*; *Population Reference Bureau*; *UK Office of Population Census and Surveys*).

Ilustración 2-7 TASAS DE NATALIDAD Y PIB *PER CÁPITA* EN 1989

Nacimientos por 1.000 al año



Dólares de 1989 por persona al año

A medida que una sociedad se hace más rica, la tasa de natalidad de su población tiende a declinar. Todas las naciones más pobres tienen tasas de natalidad de entre 20 y 50 por cada mil personas al año. Ninguna de las naciones más ricas tiene tasas de natalidad por encima de las 20 por mil al año, excepto los ricos Estados petroleros de Oriente Próximo. (Fuentes: *Population Reference Bureau*; *CIA*).

nes, han demostrado que todos estos factores que tienen la propiedad de reducir la tasa de natalidad pueden ser provistos a la mayoría de las familias a bajos costes, pero sólo si una nación decide asignar sus recursos en ese sentido.

El crecimiento industrial no garantiza mejoras en el bienestar humano o reducciones en la tasa de crecimiento de una población. Pero puede ciertamente ayudar. Por lo tanto, es doblemente importante entender las causas y consecuencias del crecimiento industrial.

El debate público de las cuestiones económicas está lleno de confusiones, muchas de las cuales provienen de la incapacidad de distinguir entre dinero, objetos reales que el dinero representa y distintas funciones que esos objetos reales desempeñan en una economía. Es necesario hacer claramente esas distinciones aquí. La ilustración 2-8 muestra cómo representamos la economía física en World3, y cómo hablaremos de ella en este libro.

Capital industrial significa aquí los medios físicos de producción, maquinas y fábricas que producen los bienes manufacturados. (Con la ayuda, desde luego, del trabajo, la energía, las materias primas, la tierra, el agua, la tecnología, las finanzas, la gestión empresarial y los servicios de los ecosistemas naturales del planeta. Volveremos sobre estos cofactores de la producción, especialmente la energía, las materias primas, la tierra, el agua y los servicios del planeta, en el siguiente capítulo). Hemos denominado *producto industrial* al flujo continuo de productos que es generado por el capital industrial.

Parte del producto industrial está destinado al *consumo final*: coches, vestimenta, radios, refrigeradores, viviendas.

Parte del producto industrial toma la forma de brocas, pozos de petróleo, equipo de minería, oleoductos, petroleros. Todo este equipo destinado a la obtención de materias primas que permiten funcionar a todas las otras formas de capital lo hemos denominado *capital para la obtención de recursos*.

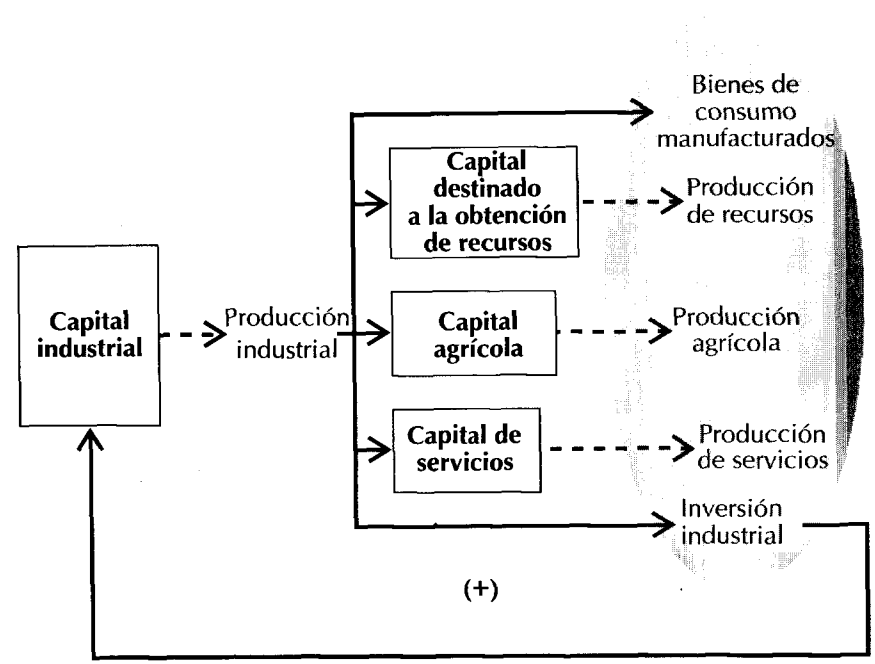
Parte del producto industrial es *capital agrícola* —tractores, henares, sistemas de regadío, cosechadoras— que genera el *producto agrario*, esencialmente comida.

Parte del producto industrial son equipos o edificios para hospitales, escuelas, bancos, tiendas al por menor. Éste es el *capital de servicios*. El capital de servicios produce su propio flujo: atención sanitaria, educación y demás.

Y, finalmente, parte del producto industrial genera más capital industrial, que denominamos *inversión industrial*: más empresas siderúrgicas, generadores eléctricos, tornos y otras máquinas, que incrementan el *stock* de capital industrial para permitir una mayor capacidad de producción en el futuro.

Hasta aquí, todo lo mencionado es real, elementos físicos, no dinero. El papel del dinero es proveer información sobre costos y valores de todos los productos (el valor es asignado por los productores y consumidores que tienen poder en el mercado). Los flujos monetarios median y motivan el flujo de capital y productos físicos. El valor monetario anual de todos los productos finales de bienes y servicios que se muestran en la ilustración 2-8 es el Producto Interior Bruto (PIB). Nuestro centro de interés en esta obra serán más los flujos físicos que los monetarios, porque los flujos físicos, y no los monetarios, están limitados por el sistema de apoyo de la tierra. Nos referiremos al PIB en varias cifras y cuadros, porque los datos económicos mundiales se conservan en términos monetarios, y no en términos físicos.

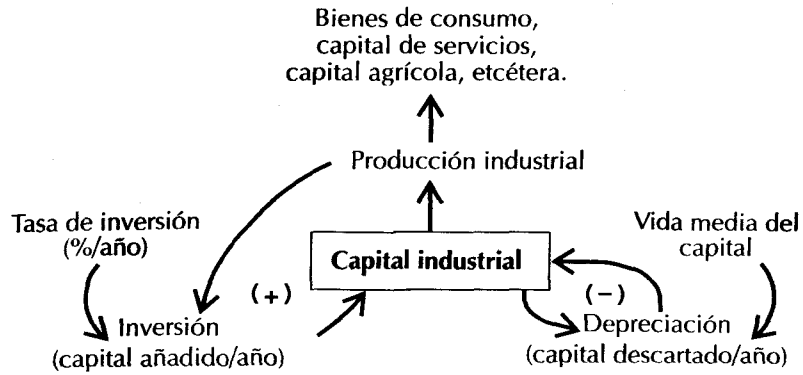
Ilustración 2-8 FLUJOS DE CAPITAL EN EL MODELO ECONÓMICO WORLD3



La producción y asignación del producto industrial es una influencia central en el comportamiento de la economía en el modelo World3. La cantidad de capital industrial determina cuánto producto industrial se puede generar cada año. Este producto es asignado entre cinco sectores de una forma que depende de los objetivos y las necesidades de la población. Parte del producto industrial es consumido, parte es asignado al sector de recursos para asegurar materias primas. Otra parte del producto industrial va a la agricultura para desarrollar la producción de la tierra y elevar su rendimiento. Otra parte del producto se invierte en servicios sociales y el resto se invierte en la industria para elevar aún más el *stock* de capital industrial.

Pero nuestro interés se centra en lo que el PIB representa: flujos materiales de capital, bienes industriales, servicios, recursos, y productos agrícolas.

Ya hemos dicho que el capital industrial es algo que puede crecer en forma exponencial por su propia capacidad de autogeneración. La estructura de retroalimentación que representa la autogeneración es similar a la que hemos dibujado para el sistema de población.



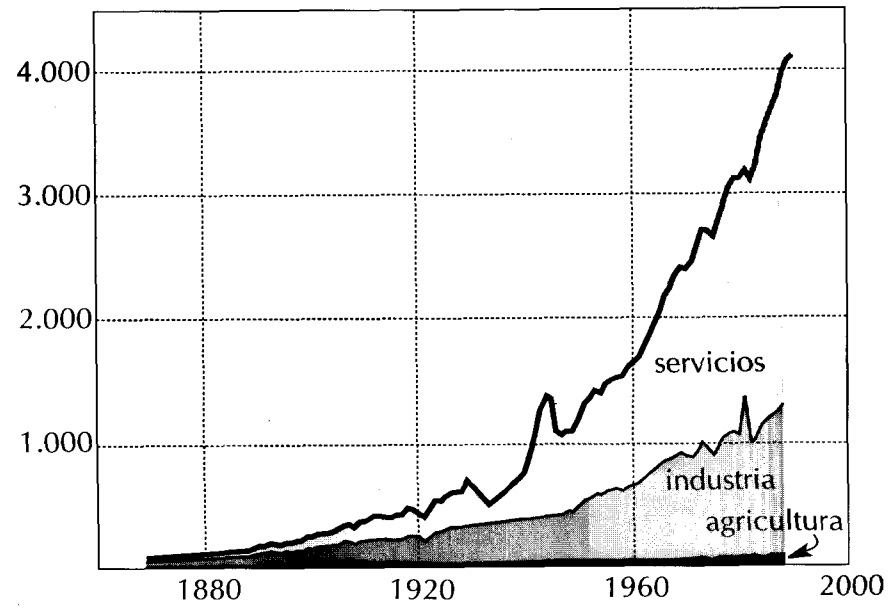
Una cantidad dada de capital industrial (fábricas, camiones, computadoras, equipos electrógenos, etc.) puede producir una cierta cantidad anual de producto industrial, mientras el trabajo, las materias primas, la energía y otros insumos necesarios sean suficientes. Algún porcentaje de la producción de cada año es inversión —telares, motores, cintas transportadoras, empresas siderúrgicas— que va a incrementar el *stock* de capital y, por lo tanto, a expandir la capacidad futura de producción. El porcentaje invertido es variable, como es variable la fertilidad humana, dependiendo de las decisiones humanas y de las restricciones económicas.

La retroalimentación positiva se muestra en la parte izquierda del diagrama anterior. Más capital supone más producción, parte de él es inversión, y más inversión crea más capital. El nuevo *stock* de capital ampliado puede generar aún más producción, y así sucesivamente. En este círculo de retroalimentación hay retrasos, ya que la planificación, financiación y construcción de los grandes bienes de capital, como vías férreas, empresas de electricidad o refinerías, puede llevar años, e incluso décadas.

El capital, como la población, tiene también un "ciclo mortal" además de un "ciclo de nacimiento". A medida que las máquinas e instalaciones industriales se desgastan o se hacen técnicamente obsoletas, son cerradas, desmanteladas y descartadas.

Ilustración 2-9 PIB DE EE UU POR SECTORES

Miles de millones de dólares de 1982 por año



La historia de la distribución del PIB de EE UU entre los sectores de servicios, industria y agricultura, muestra la transición hacia una economía de servicios. Obsérvese que a pesar de que los servicios suponen la mayor parte de la economía, los sectores agrarios e industriales siguen expandiéndose en términos absolutos. (Fuentes: *Departamento Estadístico de EE UU*; *Consejo de Asesores Económicos de EE UU*).

La tasa de depreciación del capital es análoga a la tasa de mortandad en el sistema poblacional. Cuanto más capital está presente, mayor cantidad está expuesta anualmente al desgaste, por lo tanto habrá menos al año siguiente, a no ser que el flujo de nueva inversión sea suficiente como para reemplazar al capital depreciado.

Ya que está alimentado por bucles de retroalimentación similares, el capital es capaz de sufrir los tres modelos básicos de comportamiento de la población: crecimiento exponencial, declinación exponencial y equilibrio dinámico. Al igual que las poblaciones sufrieron una transición demográfica durante el proceso de industrialización, las economías tam-

bién sufrieron una transición a largo plazo. Las economías preindustriales son economías primariamente agrícolas y de servicios. A medida que comienza a actuar el ciclo del capital, crecen todos los sectores económicos, pero el sector industrial crece durante un tiempo a mayor velocidad. Más tarde, cuando la base industrial ha sido construida, el crecimiento es más destacado en el sector de los servicios (ver ilustración 2-9).

Se dice a veces que las economías altamente industrializadas están evolucionando hacia "economías de servicios", pero en realidad siguen requiriendo una considerable base agrícola e industrial. Hospitales, escuelas, bancos, tiendas, restaurantes e instalaciones turísticas, forman parte todos del sector de servicios. Si alguna vez han observado los camiones que les llevan alimentos, papel, combustibles y equipos, o los camiones que arrastran los residuos sólidos desde estas instalaciones, saben que el moderno sector de servicios descansa sólidamente sobre una base de producción agraria e industrial.

Como en el sistema poblacional, el ciclo positivo del sistema de capital es fuertemente dominante en el mundo actual. El capital industrial ha ido creciendo en forma exponencial, más rápido que la población. Durante los veinte años que median entre 1970 y 1990, la producción industrial creció casi el 100% (como muestra la ilustración 1-2). Ese crecimiento habría supuesto en promedio el doble de la producción industrial por persona en el mundo hace veinte años si la población hubiese sido constante, pero a causa del crecimiento de la población el promedio de producción industrial por persona sólo creció en un tercio.

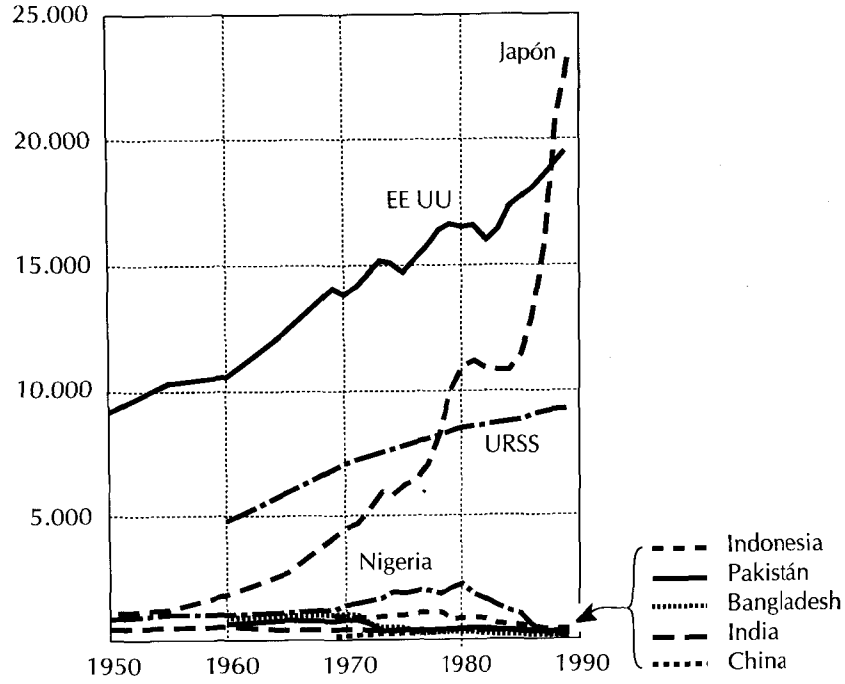
Más pobreza, más gente, más pobreza

Si el capital crece más rápido que la población, eso querría decir, de acuerdo con la teoría de la transición demográfica, que el creciente nivel de vida de la población mundial está reduciendo la tasa de crecimiento de la población.

En alguna medida y en algunos sitios eso es exactamente lo que está ocurriendo. Pero ni el crecimiento económico ni la respuesta demográfica se están desarrollando con la rapidez que podrían hacerlo, y en algunas partes del mundo ambas en realidad están retrocediendo: el bienestar económico cae y la tasa de crecimiento de la población está estancada o crece. Esto se debe a la forma en que se distribuye el crecimiento en la economía industrial.

Ilustración 2-10 CRECIMIENTO DEL PIB *PER CÁPITA* EN PAÍSES SELECCIONADOS

PIB por persona al año en dólares EE UU de 1987



El crecimiento económico se centra principalmente en las naciones que ya son ricas. Las cinco naciones de Indonesia, China, Pakistán, India y Bangladesh contienen entre todas casi la mitad de la población mundial. Su PIB *per cápita* apenas se desprende del eje cuando se traza junto con el PIB *per cápita* de las naciones más ricas. (Fuentes: *Banco Mundial*; *CIA*).

La mayor parte del crecimiento económico tiene efecto en las naciones ya industrializadas. La ilustración 2-10 muestra las curvas de crecimiento el PIB *per cápita* para algunas de las naciones más pobladas del mundo. Esas curvas reflejan cómo el crecimiento económico continúa produciéndose sistemáticamente más en las naciones ricas que en las pobres.

El *Informe sobre el Desarrollo* del Banco Mundial para 1991 da un listado de 40 naciones en el mundo menos industrializado cuyos ingresos *per cápita* han caído durante la década de 1980. Estas naciones están habitadas por más de 800 millones de personas, casi tres veces la población de América del Norte, y casi un sexto de la población mundial[14].

Hay muchas razones para el estancamiento económico de las naciones y poblaciones pobres, y algunas de ellas tienen que ver con la injusticia sistemática, la opresión y la negligencia de aquellos que no son pobres; otras, con la falta de preparación, información, oportunidades, salud y capacidad de gestión en las naciones pobres. También hay razones que tienen que ver con la simple estructura de la población y el sistema de capital tal como lo hemos descrito en este capítulo.

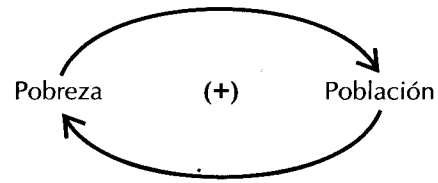
Es mucho más fácil para las poblaciones ricas ahorrar, invertir y multiplicar su capital que para las pobres, no sólo por el mayor poder de las ricas para controlar las condiciones de los mercados, adquirir nuevas tecnologías y controlar los recursos, sino porque además siglos de crecimiento acumulado han construido en las naciones ricas un gran *stock* de capital que puede multiplicarse a sí mismo todavía más. La mayor parte de las necesidades básicas se han alcanzado, lo que hace posible tasas relativamente altas de ahorro e inversión sin empobrecer el presente. El menor crecimiento de la población en las naciones ricas permite que la producción se dirija esencialmente hacia la inversión industrial, y menos hacia la inversión en los servicios necesarios para cubrir las necesidades sanitarias y educacionales de una población en rápida expansión.

En las naciones pobres el crecimiento del capital pasa momentos duros intentando equipararse con la tasa de crecimiento de la población por muchos motivos —porque el excedente invertible es canalizado hacia los inversores extranjeros, hacia el lujo de las élites locales, para el pago de deuda, o para una militarización exorbitante— y porque hay demasiada pobreza, ineficiencia técnica y mala gestión para poder generar un excedente invertible en primer lugar. La población está atada a un patrón de mayor crecimiento sin lograr por ello un mayor enriquecimiento.

La estructura del sistema que une entre sí a la población y al capital es tal, que la conducta más común del sistema mundial es la que está contenida en el viejo dicho "los ricos se hacen más ricos y los pobres tienen hijos". No es por accidente que el sistema produce esta conducta; está estructurado para hacerlo así, y continuará de esta forma, a menos que dicha estructura sea deliberadamente modificada. El crecimiento de la población hace más lento el crecimiento del capital industrial al crear una demanda creciente de escuelas, hospitales, recursos y consumo básico, retrayendo de esta forma el producto

industrial de la inversión industrial. La pobreza perpetúa el crecimiento de la población al mantener a la gente en condiciones en las que carece de educación, de atención sanitaria, de planificación familiar, de alternativas, de una forma de salir adelante que no sea la de tener una familia numerosa y esperar que los hijos puedan aportar un ingreso o ayudar a la producción familiar.

Las reuniones internacionales pueden estallar en apasionadas discusiones sobre cuál de las flechas en este ciclo de retroalimentación es más importante: la pobreza causa el crecimiento de la población, o el crecimiento de la población causa la pobreza.



En realidad ambas flechas son operativas, y pueden reforzarse entre sí en un proceso de retroalimentación positiva que desgasta hacia abajo, formando una trampa que perpetúa a los pobres como pobres y a la población en crecimiento permanente. Una consecuencia de esta trampa se muestra en la ilustración 2-11. La producción de alimentos en todas las partes del Tercer Mundo ha crecido en forma considerable en los últimos veinte años. En muchas partes se ha duplicado o triplicado. Pero, debido al rápido crecimiento de la población, la producción de alimentos por persona ha mejorado escasamente, y en África ha decrecido en forma continuada. En el periodo de 1985 a 1989 la producción de alimentos *per cápita* declinó en 94 naciones[15].

Los gráficos de la ilustración 2-11 muestran una doble tragedia. La primera es una tragedia humana. Un logro agrícola, un tremendo incremento en la producción de alimentos fue absorbido no en alimentar más a la población hambrienta, sino en alimentar a más población con hambre. La segunda tragedia es del medio ambiente. El incremento en la producción de alimentos fue a costa de la tierra, y ese coste hará que los incrementos productivos del futuro sean más difíciles. Debido a la trampa población-pobreza, un éxito agrícola se ha convertido básicamente en más desierto y más gente.

Cualquier bucle de retroalimentación positiva que desgaste el sistema hacia abajo, puede, de todas formas, ser rectificado para que funcione en el sentido contrario. Más prosperidad, distribuida ampliamente, puede desembocar en un crecimiento más lento de la población, que puede conducir a una mayor prosperidad. Con suficiente inversión sostenida durante el tiempo necesario, con un sistema de precios justos para los productos y condiciones de mercado justas, con el incremento de la producción asignado a los pobres y especialmente a la educación y empleo de la mujer, una población puede salir de la pobreza.

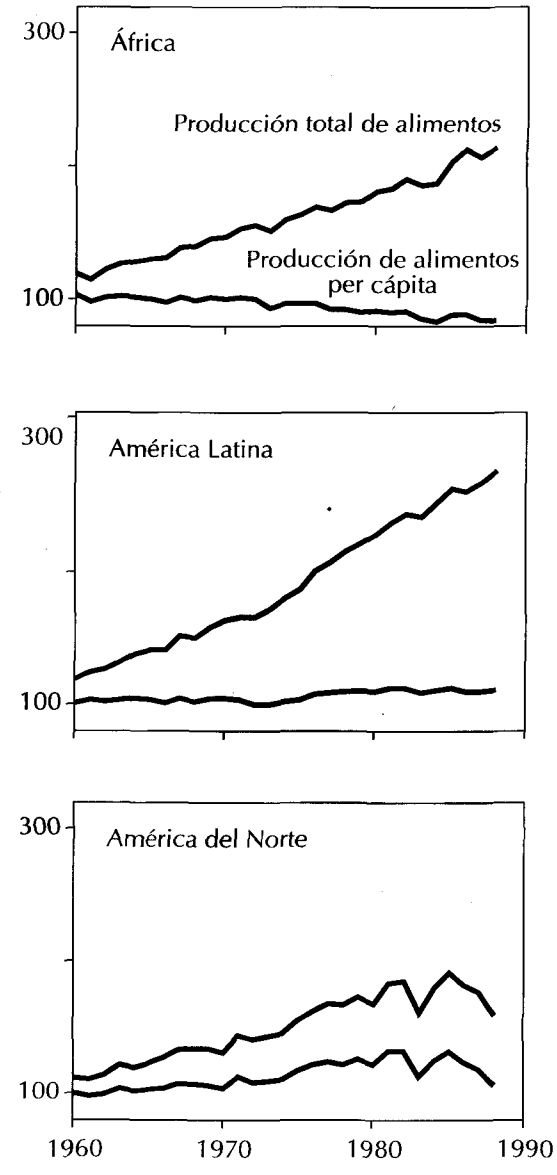
Ese proceso se ha desarrollado de forma espectacular en algunos sitios. Pero la mayor parte de la población mundial continúa en la brega por salir de la trampa de la pobreza-población. Y, como indican las ilustraciones 2-10 y 2-11, el patrón de crecimiento económico mantenido en las últimas décadas no los está ayudando.

La mente del hombre tiende a clasificar las cosas como "malas" o "buenas", y a mantener dichas clasificaciones fijadas en forma permanente. Durante generaciones tanto el crecimiento de la población como el crecimiento del capital fueron clasificados como "buenos". En un planeta escasamente poblado, con recursos abundantes, había excelentes razones para dicha evaluación. Ahora, con una crepuscular conciencia de los límites ecológicos, algunas personas desean clasificar todo el crecimiento material como "malo".

Pero la tarea de gestionar en presencia de los límites ecológicos demanda de la mente humana una mayor sutileza, una clasificación más cuidadosa. La gente más pobre necesita con desesperación más alimentos, viviendas y bienes materiales. La población más rica, con una desesperación diferente, trata de utilizar el crecimiento material para satisfacer otras necesidades, que son también muy reales pero inmateriales: necesidad de aceptación, autoestima, comunidad, identidad. Carece de sentido, en esta era de crecimiento rápido en un planeta finito, hablar de crecimiento con aprobación sin cuestionamiento o con desaprobación sin cuestionamiento. En lugar de ello es necesario preguntarse: ¿Crecimiento de qué? ¿Para quién? ¿Por cuánto tiempo? ¿A qué precio? ¿Pagado por quién? ¿Cuál es la necesidad real aquí, y cuál es la forma más directa y más eficiente para que los necesitados puedan satisfacerse?

Ilustración 2-11 PRODUCCIÓN REGIONAL DE ALIMENTOS

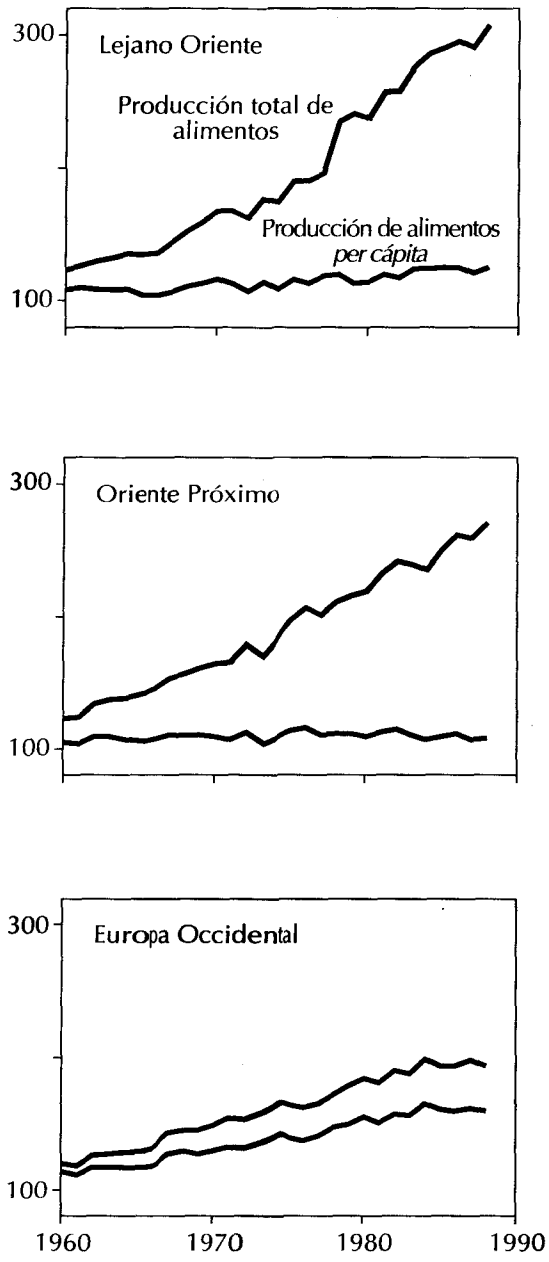
Índice (1952-56 = 100)



La producción total de alimentos se ha duplicado o triplicado en los últimos treinta años en las regiones del mundo donde el hambre es más extrema, pero la cantidad de alimentos por persona apenas ha cambiado en esas zonas, porque la población ha crecido casi a la misma velocidad. (Fuente: *FAO*).

Ilustración 2-11 (continuación)

Índice (1952-56 = 100)



Esas preguntas pueden indicar el camino hacia una sociedad que sea suficiente y equitativa. Otras preguntas pueden orientarnos hacia una sociedad que sea sostenible. ¿Cuántas personas pueden ser atendidas en este planeta? ¿A qué nivel de consumo material? ¿Durante cuánto tiempo? ¿Hasta qué punto está forzado el sistema físico que soporta a la población humana, la economía humana y todas las otras especies? ¿Cuán resistente es ese sistema de apoyo a esos tipos y cantidades de exigencias o tensiones?

Para responder a esas cuestiones, debemos mirar no al crecimiento, sino a los límites del crecimiento.

Capítulo 3:

LOS LÍMITES: FUENTES Y SUMIDEROS

Muchos esfuerzos presentes para conservar y mantener el progreso humano, para hacer frente a las necesidades humanas, y para lograr las ambiciones humanas son simplemente insostenibles, tanto en las naciones ricas como en las pobres. Sorben en exceso, y demasiado rápido, de las cuentas de recursos ambientales que ya están en descubierto. Puede que muestren beneficios en los balances de nuestra generación, pero nuestros hijos heredarán las pérdidas.

COMISION MUNDIAL DE DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE[16]

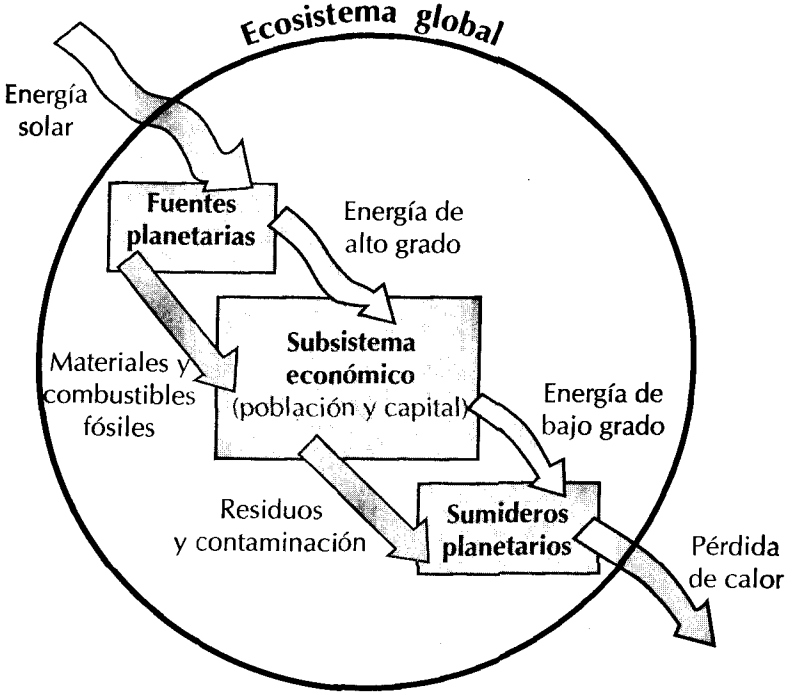
Debido a su potencial de autorreproducción, la población y el capital industrial son las fuerzas motrices detrás del crecimiento exponencial en el sistema mundial. Debido a su potencial de producción, las sociedades alientan su crecimiento.

Asumimos en el World3 que la población y el capital tienen el potencial estructural tanto de reproducción como de producción. También asumimos que esos potenciales no pueden lograrse sin un flujo continuo de energía y materiales, y sin los vertidos continuados de contaminación y desperdicios.

La gente necesita alimentos, agua, aire y nutrientes para crecer, para mantener sus cuerpos y para producir nuevas personas. Las máquinas necesitan energía, agua y aire, además de una enorme variedad de minerales, productos químicos y materiales biológicos, para producir bienes y servicios, para mantenerlos y para producir más máquinas. De acuerdo con las leyes más fundamentales del planeta, los materiales y la energía usada por la población y por el parque de capital no desaparecen. Los materiales son reciclados o se convierten en desperdicios y agentes contaminantes. La energía se disipa bajo la forma de calor inutilizable.

La población y el capital toman materiales y la mayor parte de las energías de la tierra y devuelven a ella desperdicios y calor. Hay un flujo contante de insumos totales de las fuentes de materiales y energías, a tra-

Ilustración 3-1 POBLACIÓN Y CAPITAL EN EL ECOSISTEMA GLOBAL



La población y el capital son sostenidos por flujos de combustible y recursos no renovables del planeta, y ellos producen flujos de calor y desperdicio, que contaminan el aire, las aguas y la tierra del planeta. (Fuente: *R. Goodland et al.*).

vés de la economía humana, hacia los sumideros planetarios donde acaban los desperdicios y agentes contaminantes (ilustración 3-1). Hay límites a las tasas a las que la población humana y el capital pueden usar materiales y energía, y hay límites a las tasas a las que los desperdicios pueden ser emitidos sin dañar a la gente, la economía o los procesos de absorción, regeneración y regulación de la tierra.

Cada recurso usado por la economía humana —alimentos, agua, madera, hierro, fósforo, petróleo y cientos de otros elementos— está limitado tanto por sus fuentes como por sus sumideros. La naturaleza exacta de dichos límites es compleja, porque tanto las fuentes como los sumideros forman parte de un único sistema, dinámico e interconectado: la tierra. Algunos límites son mucho más exigentes que otros. Hay límites a

corto plazo (la cantidad de petróleo procesado y a la espera en los tanques de almacenamiento, por ejemplo) y límites a largo plazo (la cantidad de petróleo en el subsuelo). Las fuentes y los sumideros pueden interactuar, y un mismo rasgo específico de la tierra puede actuar a un tiempo de fuente y de sumidero. Una parcela de tierra, por ejemplo, puede ser fuente de cosechas de alimentos y un sumidero de lluvia ácida causada por la contaminación del aire. Su capacidad de servir a ambas funciones puede depender del grado en que sirve a cada una de ellas.

El economista del Banco Mundial Herman Daly ha sugerido tres simples reglas para ayudar a ordenar esta complejidad y para definir los límites a largo plazo, o los límites sostenibles de insumos totales:

- Para una fuente renovable —tierra, aire, bosques, peces— el ritmo o tasa sostenible de explotación no puede ser mayor que la tasa de regeneración. (De esta forma, por ejemplo, la pesca es sostenible cuando la captura se hace a una tasa que puede ser reemplazada por la restante población de peces).

- Para una fuente no renovable —combustible fósil, elementos minerales de alta pureza, agua fósil del subsuelo— la tasa sostenible de explotación o uso no puede ser mayor que la tasa a la cual una fuente renovable, usada en forma sostenible, puede sustituir al elemento no renovable. (Por ejemplo, un depósito de petróleo sería utilizado en forma sostenible si parte de los beneficios que produce fueran invertidos en forma sistemática en acumuladores solares o en la plantación de árboles, de forma tal que cuando se extinga el petróleo, un flujo equivalente de energía renovable esté disponible).

- Para un elemento contaminante la tasa sostenible de emisión no puede ser mayor que la tasa a la cual el elemento contaminante puede ser reciclado, absorbido o esterilizado por el medio ambiente. (Por ejemplo, el sistema de alcantarillado puede desembocar en un lago o río en una forma sostenible a una tasa en la cual el ecosistema natural del agua pueda absorber los nutrientes.)[17]

Utilizaremos estos tres criterios en este capítulo para hacer una rápida revisión de las diversas formas de insumos totales y el estado de sus fuentes y sumideros planetarios. Comenzaremos por los recursos

renovables y preguntaremos: ¿Se los utiliza más rápido de lo que se regeneran? ¿Caen sus *stocks*? Luego pasaremos a las fuentes no renovables, cuyos *stocks* deben estar cayendo por definición. En su caso preguntaremos: ¿Se están encontrando sustitutos renovables? Podrán desarrollarse a tiempo para soportar las condiciones de la economía humana que dependen en la actualidad de elementos no renovables. Finalmente atenderemos a los contaminantes y desperdicios para preguntar: ¿Están incrementándose? ¿Están sus sumideros desbordando o pueden desbordar?

Ésas no son cuestiones para ser contestadas con el modelo World3 (nada en este capítulo depende de dicho modelo), sino mediante los datos globales, en la medida en que esos datos existen, fuente por fuente, sumidero por sumidero. Por el momento ignoraremos las interacciones de una fuente o sumidero con otro u otra (por ejemplo, el hecho de que hacer crecer más alimentos demanda más energía, o de que la tierra destinada a la agricultura habitualmente se extiende a expensas de los bosques). Necesitaremos el modelo de computadora para seguir la pista de esas interacciones, por lo cual volveremos a ellas en futuros capítulos.

Los límites que discutimos aquí son aquellos acerca de los cuales la ciencia sabe más. No hay garantía de que en realidad sean los más limitantes. Las tecnologías que mencionamos aquí están evolucionando. Ciertamente que mejorarán en el futuro. Habrá sorpresas en el futuro, agradables y desagradables. Pero aun dado lo incompleto de la comprensión humana sobre los límites, creemos que los datos presentados en este capítulo ofrecen tres puntos claros:

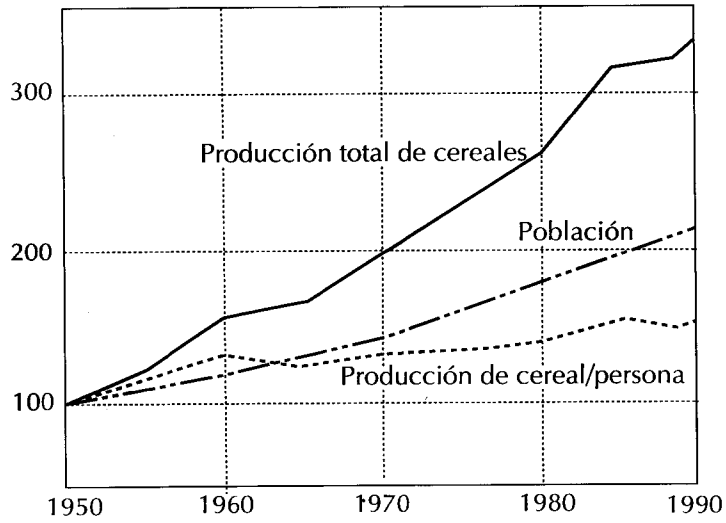
- La sociedad humana está ahora utilizando recursos y produciendo desechos a tasas que no son sostenibles.

- Estas tasas excesivas de insumos no son necesarias. Cambios técnicos, institucionales y de distribución, podrían reducirlas grandemente mientras se mantiene o incluso se mejora la calidad de vida de la población mundial.

- Pero, aun con instituciones y tecnologías mucho más eficientes, los límites a la capacidad de la tierra para soportar a la población y al capital están cerca, probablemente a una distancia no mayor que el tiempo de una duplicación o dos.

Ilustración 3-2 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE GRANO 1950-1990

Índice (1950 = 100)



Los productores agrarios del mundo obtuvieron casi tres veces más grano en 1990 que en 1950. A causa del crecimiento de la población mundial, sin embargo, la producción *per cápita* en 1990 estuvo sólo un 50% por encima del nivel de mediados de siglo. (Fuente: *FAO*).

Recursos renovables

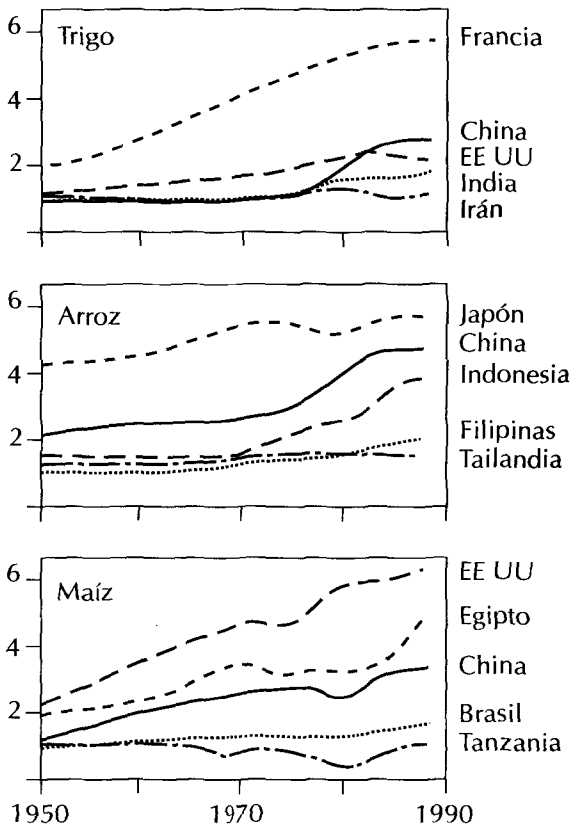
1. Alimentos

Entre 1950 y 1985 la producción mundial de granos se elevó de unos 600 millones de toneladas métricas por año a más de 1.800 millones de toneladas métricas por año. La tasa de crecimiento anual de la producción de grano fue del 2,7%, levemente más rápida que la tasa de crecimiento de la población (ilustración 3-2).

La cantidad total de alimentos producidos en el mundo en 1989, si se hubiese distribuido en forma pareja, podría haber alimentado a 5.900 millones de personas con una dieta de subsistencia, a 3.900 millones con una dieta moderada, o a 2.900 millones con una dieta a nivel europeo. (La población ese año era de 5.200 millones de personas). Estas cifras asumen un factor de desperdicio del 40% debido a pérdidas entre la cosecha y el consumo[18].

Ilustración 3-3 RENDIMIENTO DE GRANOS

Miles de kilogramos por hectárea al año



Los rendimientos de trigo, arroz y maíz son altos y comienzan a nivelarse en el mundo industrializado. En algunas naciones en vías de industrialización, como China, Egipto e Indonesia, están creciendo rápidamente. En otras naciones menos industrializadas son aún demasiado bajos, con considerable potencial para mejorar. (Con el objetivo de sobreponerse a cambios de clima, los rendimientos en este gráfico han sido promediados en ciclos de tres años). (*Fuente: FAO*).

La cantidad de alimentos producidos en un año promedio es suficiente para alimentar a la población mundial adecuadamente, pero no con profusión. Debido al desperdicio y a la distribución desigual, alimenta a parte de la población con profusión, a parte moderadamente, y a otra parte en forma inadecuada.

De los más de 5.000 millones de habitantes de la tierra, 1.000 millones están comiendo en cualquier momento determinado menos alimentos

que los que su cuerpo requiere. Alrededor de entre 500 y 1.000 millones sufren hambre crónica. Cada año 24 millones de niños nacen por debajo del peso necesario. En 1990 se estimó que 204 millones de niños de menos de cinco años estaban seriamente desnutridos[19].

A grandes rasgos, unos 13 millones de personas mueren cada año por causas relacionadas con el hambre. Eso hace un promedio de 35.000 muertes por hambre cada día. La mayor parte de los que mueren son niños.

El hambre no persiste en el mundo a causa de los límites físicos —no por el momento, sin embargo—. Los alimentos podrían ser distribuidos en forma más equitativa, se podrían reducir las pérdidas ocasionadas tras las cosechas y se podría incrementar la producción de alimentos. Por ejemplo, la ilustración 3-3 muestra las tendencias en el rendimiento de la producción de granos en varios países. El rendimiento en las naciones altamente industrializadas está acercándose a sus límites prácticos. Pero los rendimientos podrían ser mucho más altos en muchas naciones en proceso de industrialización.

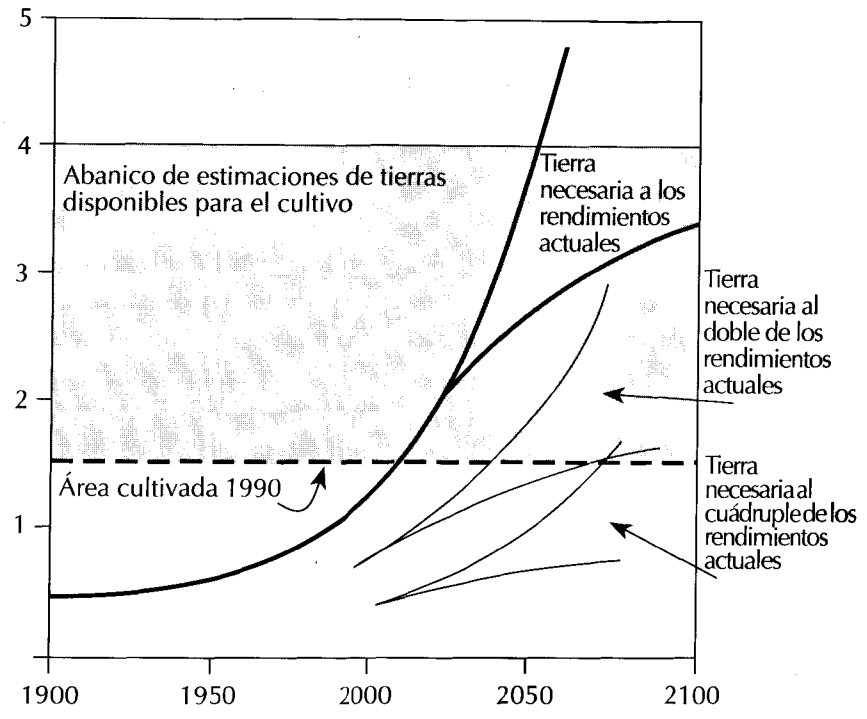
En un detallado estudio de los suelos y climas de 117 países de América Latina, África y Asia, la FAO ha estimado que sólo 19 de esos países, con una población conjunta de 104 millones de personas, no estarían en condiciones de alimentar a sus poblaciones estimadas para el año 2000 con sus propias tierras si pudieran usar cada hectárea de tierra productiva y obteniendo los máximos rendimientos técnicamente posibles. De acuerdo con este estudio, si todas las tierras cultivables fueran asignadas a alimentos, si no hubiera pérdidas por erosión, y si el clima fuera perfecto, la gestión perfecta, y la utilización de insumos agrícolas sin restricciones, los 117 países estudiados podrían multiplicar su producción de alimentos por un factor de 16[20].

Un límite obvio a la producción de alimentos es la tierra[21]. Estimaciones teóricas de la cantidad de tierra disponible para la producción agraria sobre la tierra van de los 2.000 a los 4.000 millones de hectáreas (dependiendo de lo que se considere "cultivable"), de las que en la actualidad se cultivan y cosechan aproximadamente 1.500 millones. La superficie realmente cultivada se ha reducido levemente en los últimos veinte años a causa de las pérdidas por erosión, salinización, urbanización, y desertización, que han superado ligeramente al desarrollo de nuevas superficies de cultivo[22].

Tal como indica la ilustración 3-4, considerando una amplia gama de supuestos sobre el futuro, el límite de las tierras cultivables está próximo, pero aún se puede extender. La línea de trazo grueso y continuo de la ilus-

Ilustración 3-4 POSIBLES FUTUROS DEL SUELO

Miles de millones de hectáreas



Las líneas gruesas y de punteado oscuro muestran extrapolaciones de tierras potencialmente cultivables, y tierras necesarias para mantener la actual producción agraria *per cápita* (si la población mundial crece de acuerdo con las estimaciones del Banco Mundial y de acuerdo con la tasa de crecimiento exponencial de la actualidad). Las líneas menos gruesas muestran la necesidad de tierras si el rendimiento de las cosechas se duplica o cuadruplica. La zona sombreada muestra la gama de estimaciones de tierras que podrían ser transformadas en cultivables hipotéticamente —en su mayor parte estas tierras son actualmente bosques. (Fuentes: *G.M. Higgins et al.*; *World Resources Institute*; *R. A. Bulato et al.*).

tración 3-4 muestra la cantidad de tierra que se necesita para mantener la producción de alimentos *per cápita* en sus niveles presentes, asumiendo el promedio mundial actual de 0,28 hectáreas por persona, y en el supuesto de dos poblaciones futuras. Las curvas menos gruesas por debajo muestran la tierra necesaria si los rendimientos mundiales pudieran duplicarse o aun cuadruplicarse.

El área sombreada en la ilustración 3-4 muestra la cantidad de tierra posiblemente disponible. El borde superior de esta área asume la asignación de cada trozo disponible de tierra a la produción de alimentos y sin que se registren pérdidas de tierras por urbanización o erosión. El borde inferior asume que la tierra en cultivo se mantendrá en su actual nivel de 1.500 millones de hectáreas. (Si esta área continúa manteniéndose por el desarrollo de nuevas tierras, dejando detrás tierras devastadas, será como deprimir el margen superior, y no podrá ser sostenida).

En la ilustración 3-4 puede verse con qué rapidez el crecimiento exponencial de la población ha llevado al mundo desde una posición de gran abundancia de tierras a otra de escasez potencial. Durante toda la historia de la humanidad ha habido un considerable exceso de tierras potencialmente cultivables, pero en un lapso de unos treinta y cinco años (el periodo de la última duplicación de la población) ha surgido una repentina escasez.

Pero la ilustración 3-4 también indica cuántas posibilidades de respuesta puede haber, dependiendo de la resistencia de la base de recursos y la flexibilidad técnica y social de la humanidad. Si se desarrollara más tierra, o se repusiera tierra erosionada, si no se perdiera más tierra, si los rendimientos se pudieran duplicar a nivel mundial, cada uno de los actuales 5.400 millones de habitantes podría tener el suficiente alimento, y también podrían tenerlo los 12.500 millones de personas que puede haber sobre la tierra para finales del próximo siglo. Sin embargo, si continúa la erosión de las tierras, si la reposición o el desarrollo de tierras resulta demasiado caro, si otra duplicación del rendimiento es demasiado difícil o supone graves riesgos medioambientales, si las tasas de natalidad no bajan con rapidez en la forma en que el Banco Mundial estima que lo harán, los alimentos pueden resultar limitados no sólo a escala local, sino globalmente.

Dadas las incertidumbres reflejadas en la ilustración 3-4, se hace evidente que la humanidad no puede arriesgarse a perder tierras de labranza. A pesar de ello hay pérdida de tierras. La degradación del suelo es un proceso notoriamente difícil de medir, pero no caben dudas de que está difundido. Cuando se busca la estimación cuantitativa de la extensión de este fenómeno, se encuentran informaciones parciales pero sugerentes, como éstas:

> Durante veinte años desde el primer Día de la Tierra en 1970, los desiertos se han expandido en unos 120 millones de hectáreas, concentrando más tierras que las que actualmente están dedicadas a la agricultu-

ra en China... En poco más de dos décadas... los agricultores del mundo han perdido unos 480.000 millones de toneladas de tierra de primera calidad, equivalente a grandes rasgos a las superficies de cultivo de la India[23].

Las políticas cortas de vista conducen a la degradación del recurso básico de la agricultura en prácticamente todos los continentes: la erosión del suelo en América del Norte; la acidificación del suelo en Europa; la deforestación y desertización en Asia, África y América Latina; y desperdicios y contaminación del agua en casi todas partes... A finales de la década de 1970 la erosión excedía a la formación en alrededor de un tercio del suelo cultivable de EE UU... En Canadá, la degradación del suelo ha costado a los productores agrarios 1.000 millones de dólares anuales... En la India la erosión del suelo afecta a entre el 25% y el 30% de la tierra en cultivo. Sin medidas de conservación, las superficies totales de tierras de cultivo de irrigación pluvial en... Asia, África y América Latina se reducirán en 544 millones de hectáreas a largo plazo[24].

En la mayoría de las áreas del Tercer Mundo el problema de la degradación de las tierras es severo. Se ha estimado que entre seis y siete millones de hectáreas de tierra agrícola se convierten cada año en improductivas a causa de la erosión. Inundaciones, salinización y alcalinización dañan otros 1,5 millones de hectáreas... El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente reveló que a principios de la década de 1980 un total de 1.501 millones de hectáreas de tierras sin explotar y de cultivos sufrían de una desertización moderada[25].

La pérdida de la base de recursos agrícolas es consecuencia de diversos factores, entre los que se incluyen la pobreza y la desesperación, la expansión de los asentamientos humanos, el exceso de pastoreo y de cultivo, la mala gestión, la ignorancia, y la retribución económica a las producciones a corto plazo en lugar de la preocupación por el largo plazo.

Hay otros límites a la producción de alimentos además de la tierra, entre ellos la disponibilidad de agua y los sumideros para los productos químicos de uso agrícola (que serán analizados más adelante en este capítulo). Muchas partes del mundo ya están más allá de alguno de esos límites. Los suelos se erosionan, los regadíos están agotando las aguas subterráneas, y los vertidos del suelo están contaminando las aguas de superficie y las subterráneas. Estas excursiones más allá de los límites no pueden sostenerse, y tampoco son necesarias.

Los métodos de cultivo que conservan y refuerzan la capacidad de los suelos —como el cultivo en terraza, el arado en contorno, el abono natural de los suelos con compuestos, la cosecha a cubierto, el policultivo y la rotación de cultivos— son conocidos y se han utilizado durante siglos. Otros métodos de especial aplicación en los trópicos, como el cultivo en galería y la explotación agrícola en los bosques, son objeto de desarrollo experimental[26]. Tanto en las zonas templadas como en las zonas tropicales se obtienen altos rendimientos en forma sostenible sin necesidad de aplicar altas dosis de fertilizantes o pesticidas[27]. Millones de productores agrarios en todas las partes del mundo han adoptado técnicas de cultivo ecológicamente sanas, orientadas a la conservación del suelo. El reto es lograr que todos los agricultores lleguen a dominar y utilicen este tipo de técnicas. Y eso no es un problema técnico, sino social[28].

Si el flujo de alimentos a través de la sociedad humana fuese más eficiente, padeciera un menor índice de desperdicio, no sería necesario producir más. Aunque también podría generarse más alimentos y de forma sostenible. Pero ésas son afirmaciones gratuitas. La realidad actual es que en muchas partes del mundo las fuentes de alimentos —tierras, aguas y nutrientes del suelo— están cayendo y los sumideros de los agentes contaminantes generados en la agricultura se están desbordando. En esos sitios, las tasas de insumos agrícolas totales ya se encuentran más allá de sus límites sostenibles. A menos que se hagan rápidos cambios —cambios que son realmente posibles— la población mundial en crecimiento exponencial deberá intentar seguir alimentándose de una base agrícola en proceso de degradación.

2. Agua

En reuniones internacionales sobre recursos hemos oído con frecuencia la afirmación de que incluso en la década de 1990 algunas naciones o regiones deberán detener su crecimiento o ir a la guerra, o ambas cosas a la vez, debido a la escasez de agua.

Dicha afirmación proviene de la intuición de los hidrólogos, una intuición informada por la observación de gráficos como el representado en la ilustración 3-5. Este gráfico es sólo ilustrativo, porque el agua es sólo un recurso regional y no global. Cada gráfico regional de las aguas, no obstante, tiene las mismas características generales que esta representación global: un límite, un número de factores que pueden ampliar ese límite o que lo pueden hacer inalcanzable, y un crecimiento exponencial hacia ese límite.

En la ilustración 3-5 el límite físico es la extinción de todos los arroyos y ríos del mundo. Éste es el flujo renovable de donde la economía humana toma todos los insumos de agua fresca. Es una colosal masa de agua, 40.000 kilómetros cúbicos al año. Puede parecer un límite muy remoto, si se tiene en cuenta que el uso humano anual de agua es de sólo 3.500 kilómetros cúbicos al año[29].

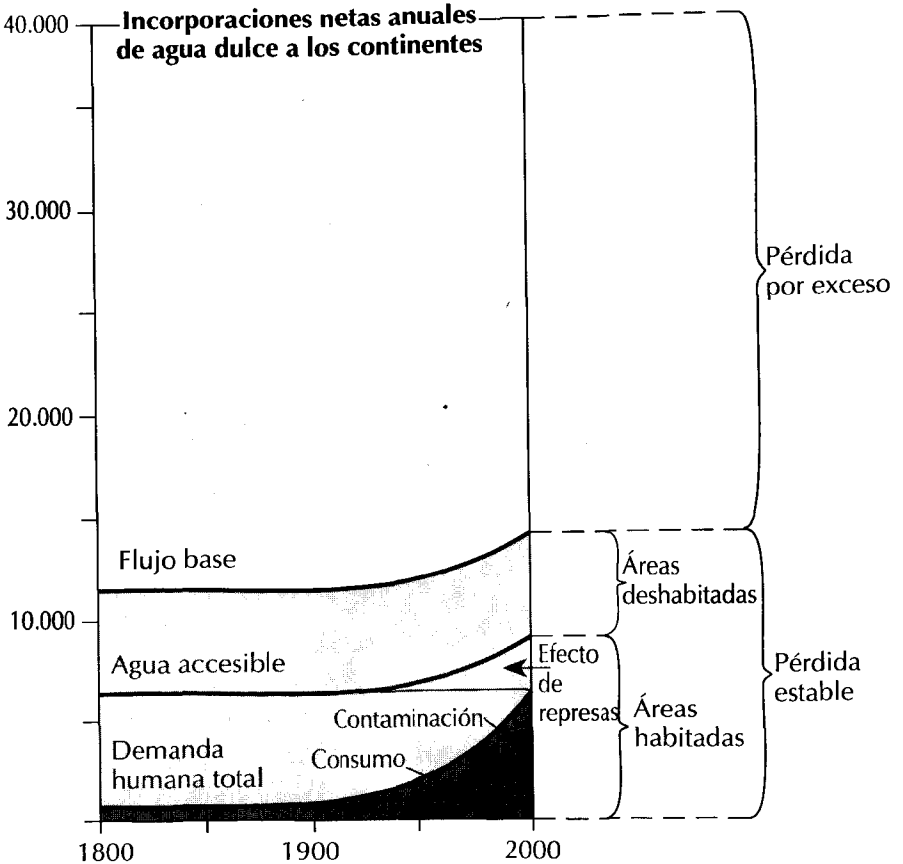
En la práctica, sin embargo, los recursos no pueden ser utilizados en todo su potencial. Mucha de la demanda es estacional. No hay forma posible de almacenar semejante cantidad de agua. Por lo tanto unos 28.000 kilómetros cúbicos por año fluyen hacia el mar en forma de torrentes. Esto deja sólo 12.000 kilómetros cúbicos que pueden ser contenidos y contabilizados como un recurso sostenible. Más aún, algunos ríos fluyen en zonas de escasa población, especialmente en los trópicos y en la cercanía de los polos. Los cursos de agua estables accesibles representan por lo tanto sólo unos 7.000 kilómetros cúbicos al año.

De todas formas, la ilustración 3-5 muestra también que los seres humanos están elevando el límite mediante la construcción de diques y presas para atrapar el agua de torrentes estacionales que de otra forma se perdería. Para finales del presente siglo las presas de construcción humana aumentarán la provisión de aguas sostenibles en unos 3.000 kilómetros cúbicos al año[30]. (Las presas anegan tierras, desde luego, y las tierras de las cuencas hidrográficas que suelen anegarse son en general tierras de alto rendimiento agrícola). Hay otras formas de elevar el límite del agua, como la desalinización del agua de mar, nuevos asentamientos en zonas deshabitadas y transporte a larga distancia del agua. Estos cambios pueden tener importancia local, pero hasta el momento son demasiado pequeños como para tener peso en un gráfico a escala global.

La ilustración 3-5 también muestra que hay un monumental desperdicio de los recursos hidrológicos. El proceso se hace visible en la línea

Ilustración 3-5 RECURSOS DE AGUA DULCE

Kilómetros cúbicos por año



Un gráfico de los recursos globales de agua dulce y su utilización muestra con qué velocidad el crecimiento exponencial en el consumo y en la contaminación puede acercar la cantidad total de agua estable a la que es accesible para el hombre. En 1950 la demanda humana de agua dulce representaba sólo la mitad del agua accesible. Sólo un esforzado programa de construcción de presas dejaría algún margen entre la demanda y la oferta para el año 2000. (Fuente: *R. P. Ambroggi*).

que denota la contaminación. La cantidad de agua que es inutilizada por la contaminación es casi tan grande como la cantidad usada por la economía humana. Hay además otro desperdicio de agua, que no se muestra en la ilustración, por el uso ineficaz del agua.

Finalmente hay un crecimiento exponencial de la demanda, impulsado por la población y el capital. La demanda global de agua ha crecido con mayor rapidez que el movimiento al alza de los límites del recurso por la construcción de presas. Y a medida que los sitios más favorables sean utilizados y aumente la oposición ciudadana a las represas, la construcción de los embalses habrá de decrecer.

Globalmente hay un gran exceso de agua, pero, debido a los límites operativos y a la contaminación, puede en realidad soportar a lo sumo sólo una nueva duplicación de la demanda, que se producirá en 20 o 30 años[31]. Aun en el caso de que se pudiera eliminar toda la contaminación, conservar cada gota de agua, llevar el agua hacia la gente o a la gente hacia el agua, aun cuando fuese posible y deseable capturar los 40.000 kilómetros cúbicos anuales de vertido de aguas para destinarlos al uso humano, sólo habría suficiente agua para tres o cuatro duplicaciones de la población mundial —dentro de unos 100 años si se mantienen las actuales tasas de crecimiento.

No es necesario esperar a una escasez global de agua para ver qué es lo que ocurre cuando una sociedad sobrepasa sus límites hidrológicos. Se puede analizar aquellos sitios del mundo en los que ya ha ocurrido. Lo que ocurre depende de que la sociedad sea rica o pobre, de que tenga vecinos con exceso de agua y de cómo se lleve con esos vecinos. Las sociedades con vecinos bien avenidos, como el sur de California, pueden construir canales, acueductos y sistemas de bombeo para importar el agua. Las sociedades ricas con vastas reservas de petróleo, como Arabia Saudí, pueden utilizar la energía fósil para desalinizar las aguas marinas. Sociedades ricas que carecen de petróleo y agua, como Israel, pueden desarrollar ingeniosa tecnologías para utilizar cada gota de agua con una eficacia máxima y pueden desplazar sus economías hacia actividades con una demanda de agua menos intensiva. Sociedades que carecen de estas opciones deben desarrollar severos racionamientos y esquemas de regulación. Entretanto, las sociedades pobres padecen hambre y/o conflictos por el agua[32].

La mayor parte de las sociedades con limitaciones de agua, ricas y pobres, se abandonan a la tentación de explotar las reservas de agua subterránea en forma insostenible. Más de cuatro millones de hectáreas de tierras de cultivo en Estados Unidos están irrigadas con agua que se bombea a un ritmo más intenso que la capacidad de los sistemas acuíferos para reponer el recurso. Edificios de Bangkok y de Ciudad de México se están hundiendo porque el agua subterránea que fluye debajo de ellos ha sido consumida. El nivel de las aguas en los pozos artesianos de Pekín cae a razón de un metro al año; en Manila el ritmo de caída es de entre 4 y 10 metros por año; en el Estado indio de Tamil Nadu la caída tiene un ritmo anual de entre 25 y 30 metros. El agua salada comienza a aparecer en los sistemas acuíferos sobreexigidos en ciudades costeras como Dakar, Yakarta, Lima y Manila[33].

La explotación del agua subterránea, la importación de agua y la desalinización son estrategias que pueden sostener localmente, durante cierto tiempo, una economía que ha crecido más allá de los límites de sus reservas de agua. Ninguna de estas estrategias es de aplicación global o indefinida. El agua no es el límite más riguroso en todas partes. Donde sí es un límite severo, se puede manejar con un menor desperdicio, reducción de la contaminación y mejor administración. Pero en algún punto esas partes de la economía humana que ya han crecido más allá de sus límites deberán aceptar el simple hecho de que no pueden seguir creciendo en forma exponencial contra el recurso renovable pero finito del agua sobre la tierra.

3. Bosques

Antes de que la especie humana inventara la agricultura había 6.000 millones de hectáreas de bosques sobre la tierra. Ahora quedan 4.000 millones, y sólo 1.500 millones son bosques primarios inalterados[34]. La mitad de esa pérdida forestal ocurrió entre 1950 y 1990.

EE UU (exceptuando Alaska) ha perdido un tercio de su cubierta forestal y un 85% de sus bosques primarios. En Europa no quedan bosques primarios. Los bosques restantes son plantaciones gestionadas de unas pocas variedades de árboles comerciales. China ha perdido tres cuartas partes de sus bosques. Los grandes bosques templados restantes están en Canadá y Rusia, donde quedan 1.400 millones de hectáreas, la mitad de ellas sin hollar por la actividad productiva humana. Las forestas de zonas templadas son en la actualidad relativamente estables en dimensiones, aunque muchas de ellas declinan en materia de nutrien-

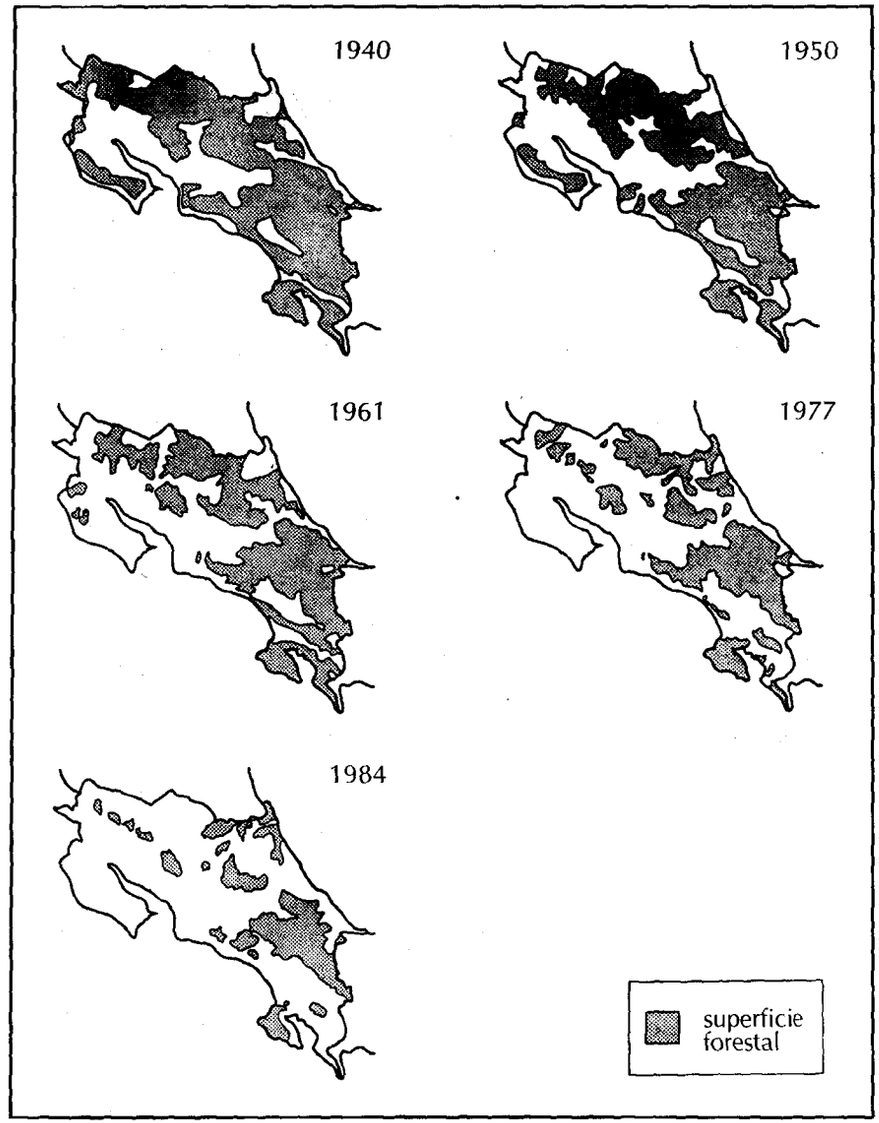
tes del suelo, composición de sus especies, calidad de la madera y tasa de crecimiento.

La historia de la explotación de los bosques de zonas templadas no se repetirá en los trópicos, porque los suelos tropicales, climas y ecosistemas, son muy distintos de los templados. Las forestas tropicales son mucho más ricas en especies, tienen tasas de crecimiento mucho más rápidas, pero son mucho más vulnerables que los bosques templados. No hay garantías de que puedan sobrevivir incluso a un claro extenso sin seria degradación de sus suelos y de la integridad del ecosistema. En la actualidad se experimentan métodos para la explotación forestal selectiva o en franjas para permitir la regeneración de las especies. Sin embargo, la mayor parte de la explotación de la madera a gran escala que se desarrolla en la actualidad trata a los bosques forestales como si se tratara de recursos no renovables.

En los trópicos se ha perdido la mitad de la capa forestal. La mitad restante ha sido explotada industrialmente y degradada. Nadie sabe a ciencia cierta a qué velocidad se explota la madera en esos bosques. El primer intento serio de evaluar las tasas de deforestación tropical, realizado por la FAO en 1980, arrojó una cifra de 11,4 millones de hectáreas anuales perdidas. A mediados de la década de 1980 esa cifra habría subido a 20 millones de hectáreas anuales. Tras algunos cambios en la política forestal, especialmente en Brasil, la tasa de pérdida de bosques parecía haber descendido en 1990 a unas 17.000 hectáreas anuales.

La ilustración 3-6 muestra la extensión y velocidad de la deforestación en un pequeño país, Costa Rica, cuya historia reciente demuestra algunas de las peores y mejores políticas forestales del mundo. Buena parte de los bosques de Costa Rica fueron talados para desarrollar la ganadería extensiva destinada a la exportación de carne. Muchas de las nuevas zonas de pastoreo demostraron ser insostenibles. Pocos años después dejaron de ser tierras de pastoreo, se erosionaron y fueron abandonadas. En las empinadas laderas de las colinas, durante la época de lluvias fuertes, se registraban movimientos de tierras que destruían pueblos y carreteras. La capa superficial de las tierras erosionadas llenó las reservas de agua detrás de las represas hidroeléctricas o se precipitó al océano, donde enterró y mató a los arrecifes de coral y a la población ictícola. La tierra conservará las cicatrices de la corta era de producción intensiva de carne costarricense durante mucho tiempo.

Ilustración 3-6 SUPERFICIE FORESTAL EN COSTA RICA 1940-1984



Las áreas forestales de Costa Rica se han visto fuertemente disminuidas durante un largo periodo de 50 años. La mayor parte de los bosques remanentes, sin embargo, se encuentran protegidos en la actualidad. (Fuente: *C. Quesada*).

Costa Rica actuó con retraso pero eficazmente para preservar los bosques que le quedan y para restaurar parte de los que ha perdido. La mayor parte de los restantes bosques primarios del mundo están en parques nacionales y otras regiones protegidas. A través de una serie de operaciones de intercambio de deuda-por-naturaleza, Costa Rica está obteniendo los recursos necesarios para poner a punto la infraestructura y la experiencia que mantendrá a estos bosques protegidos para el estudio científico y el ecoturismo, que puede crear más empleo e intercambios internacionales, sostenibles a largo plazo, que los que nunca hubiera podido rendir la poco afortunada experiencia de la cría de ganado.

Los motivos para la deforestación varían de una nación tropical a otra. Entre los responsables de esta catástrofe se encuentran las empresas multinacionales madereras y papeleras; los gobiernos ansiosos de incrementar las exportaciones y pagar la deuda externa; ricos terratenientes locales; productores de carne; granjeros; y los habitantes pobres que aspiran a una parcela cultivable o al uso de madera para leña. Estos actores suelen trabajar en concierto: el Gobierno, invitando a las compañías; las compañías, deforestando para exportar la madera; y la población pobre que se desplaza a lo largo de las rutas madereras, buscando tierra para producir.

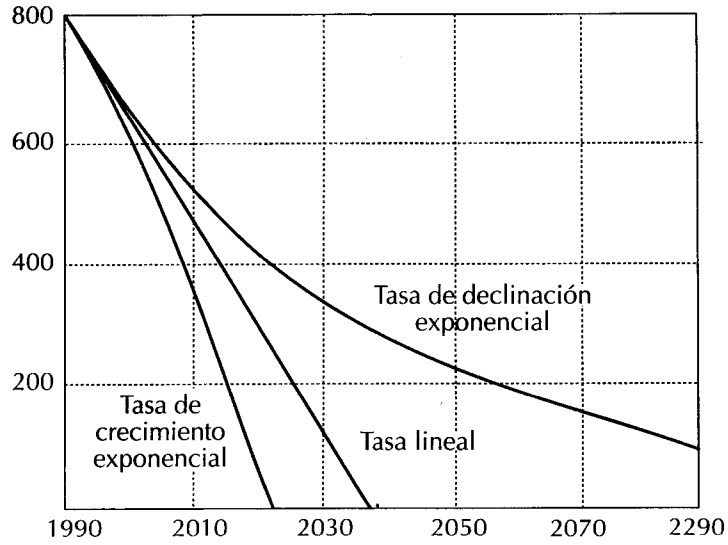
¿Cuál es el futuro de los bosques tropicales? Se pueden manejar varias hipótesis diferentes para extrapolar hacia el futuro las actuales tasas de pérdida. La ilustración 3-7 muestra algunas de las posibilidades. Lo que quedaba en 1990 de los bosques tropicales cubría aproximadamente 800 millones de hectáreas (unos 330 millones estaban en Brasil). Ese año se taló un 2,1% de esa superficie.

- Si la tasa de deforestación crece en forma exponencial, digamos que a la tasa de crecimiento de la población en las regiones tropicales (en torno al 2,3% anual), los bosques se extinguirán en 30 años. Esta curva parte de la presunción de que las fuerzas motrices que impulsan la deforestación crecerán en forma exponencial.

- Si la tasa de deforestación se mantiene constante en 17 millones de hectáreas anuales, los bosques se habrán acabado en 47 años. Esta posibilidad está representada por la línea recta de la ilustración 3-7. Parte del supuesto de que las fuerzas que impulsan la deforestación no se reforzarán, pero tampoco decaerán.

Ilustración 3-7 POSIBLES CAMINOS DE LA DEFORESTACIÓN TROPICAL

Área forestal remanente (millones de hectáreas)

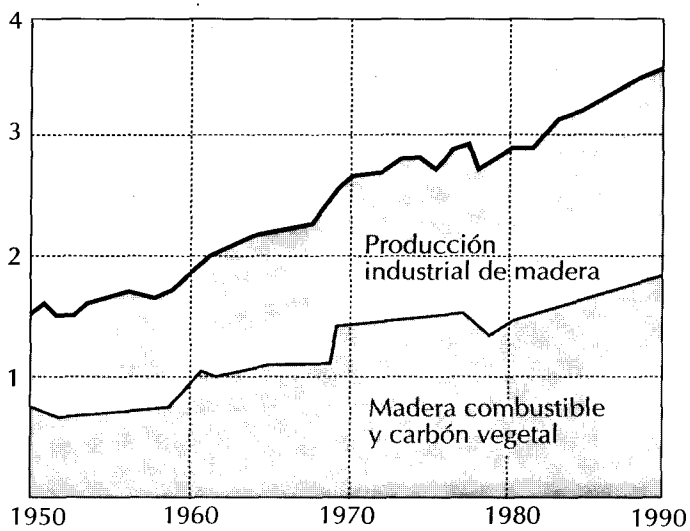


Las estimaciones sobre la pérdida futura de los bosques tropicales dependen del tipo de datos que se asuman sobre las tendencias demográficas, jurídico-legales y económicas. Los tres escenarios, que se muestran en este gráfico, indican una gama de posible evolución si no hay un acuerdo eficaz y concertado para proteger los bosques remanentes. Si la pérdida inicial de 17 millones de hectáreas anuales se incrementa junto con la población en un 2,3% anual, no habrá más bosques para el 2020. Si la tasa de pérdida se mantiene constante en 17 millones de hectáreas anuales, los bosques se extinguirán para el 2040. Si la tasa de deforestación es del 2,1% anual del área restante cada año, los bosques declinarán gradualmente hacia cero a lo largo de 100 años o más.

- Si la tasa de deforestación se mantiene como un porcentaje constante de los bosques remanentes (2,1% anual), el área devastada será levemente menor cada año. El área de bosques decaerá gradualmente tendiendo a cero; la mayor parte habrá desaparecido en 100 años. Esta proyección parte del hecho de que cada tala de árboles hace menos probable la siguiente, quizá porque primero caen los bosques más próximos y más valiosos.

Ilustración 3-8 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE MADERA EN TRONCOS

Miles de millones de metros cúbicos de madera por año



La producción de troncos de madera equivale al volumen total de madera talada de los bosques y de los árboles que están fuera de los bosques. Los productos obtenidos de los troncos incluyen troncos para aserradero, madera para enchapado, pulpa de madera, otro tipo de troncos industriales, y madera para combustible. Las estadísticas incluyen los volúmenes registrados y los volúmenes estimados sin registrar. (Fuente: *FAO*).

El futuro real seguramente será más complejo que cualquiera de estas curvas teóricas, ya que crecerán las poblaciones, la lejanía de los bosques y su menor calidad harán más difícil la labor, y aumentará la presión política para la protección de al menos algunos de los bosques que quedan. El problema es simplemente que la demanda mundial creciente de madera para la construcción, productos de papel, y madera para combustible (ilustración 3-8), está llevando a la extinción de los bosques en casi todo el mundo.

La deforestación en China sobrepasa a la reforestación por 100 millones de metros cúbicos al año. Los bosques de la India se encogen en 1,5 millones de hectáreas al año; su demanda de madera sobrepasa a la reforestación por un factor de 7. La explotación maderera en la provincia canadiense de British Columbia en 1989 sobrepasaba los niveles

sostenibles en un 30%. La explotación de maderas blandas en la costa Oeste de Estados Unidos durante la década de 1980 superaban las tasas sostenibles en un 25% en las tierras propiedad de las empresas explotadoras y en un 61% en los bosques de propiedad estatal. La escasez de madera para calefacción es crítica en la India y en buena parte del África subsahariana. El Banco Mundial pronostica que a lo largo de la próxima década la cantidad de países tropicales que exportan madera caerá de 33 a 10[35].

La sobreexplotación es una amenaza para los bosques. Otra es la contaminación. Tres cuartos de los bosques europeos, durante años gestionados para obtener de ellos una producción sostenible, se han visto seriamente dañados por la contaminación del aire y la lluvia ácida. El daño producido a los bosques por la contaminación se estima que cuesta a Europa unos 30.000 millones de dólares anuales, casi tanto como el valor de la producción anual de hierro y acero de Alemania, y tres veces más que los gastos anuales europeos en el control de la contaminación del aire. Aun en el caso de que Europa reduzca las actuales emisiones de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y amoniaco entre un 60% y un 80%, algunos de sus bosques seguirán estando amenazados[36]. La enorme floresta de la Rusia europea —igual en tamaño a todos los otros bosques de Europa— está amenazada tanto por la contaminación del aire como por la explotación maderera muy por encima de sus niveles de sostenibilidad[37].

La pérdida de bosques es un problema por más razones que la simple pérdida de la fuente de productos basados en la madera. Un bosque en pie es un recurso en sí mismo, que desempeña funciones vitales que están más allá de una medición económica. Los bosques crean suelos, moderan el clima, controlan las inundaciones y almacenan agua en prevención de las sequías. Amortiguan el efecto de erosión de las lluvias, retienen la tierra en los declives y mantienen a las costas marinas y a los ríos libres de la precipitación del sedimento aluvial. Albergan y soportan la mayor parte de las especies vivas de la tierra. Sólo los bosques tropicales, que cubren escasamente el 7% de la superficie de la tierra, albergarían a un 50% de las especies sobre la tierra. Los bosques toman y fijan un gran *stock* de carbono, que ayuda a mantener el equilibrio del *stock* de dióxido de carbono en la atmósfera, y sirven por lo tanto para combatir el fenómeno invernadero (tema sobre el cual se abunda más adelante en este capítulo).

Como en el caso del suelo y del agua, las tasas insostenibles actuales no son realmente necesarias. La tasa de deforestación se podría reducir

sensiblemente eliminando el desperdicio industrial de la madera e incrementando el reciclado. Estados Unidos tiene la tasa más alta de utilización de papel del mundo (317 kilogramos por persona por año), la mitad de la cual se desperdicia en empaquetado de ciclo corto, y del cual sólo un 29% se recicla. Japón recicla el 50% de su papel, pero también utiliza maderas duras tropicales de alta calidad para hacer paneles de madera terciada destinada a moldear el hormigón, paneles que son tirados después de uno o dos usos. La mitad del consumo de madera estadounidense se podría eliminar incrementando la eficiencia de los aserraderos, de las fábricas de madera terciada, de la construcción, duplicando el reciclado del papel y reduciendo el uso del papel para productos descartables. Pasos similares, adoptados en todos los países industrializados, podrían combinarse con estufas de alto grado de aprovechamiento de combustible en los países industrializados, para reducir la demanda mundial de madera[38].

La explotación maderera, especialmente en los bosques tropicales, podría desarrollarse de tal forma que se redujera su impacto negativo sobre los suelos, cursos de agua y árboles no explotados. Se podrían incrementar sensiblemente las plantaciones de bosques de alto rendimiento, no a expensas de los bosques primarios, sino en tierras ya explotadas o marginales. La agricultura de alto rendimiento podría reducir la necesidad creciente de éxodo de la población hacia zonas forestales en busca de tierras. Se podrían eliminar los subsidios gubernamentales directos e indirectos destinados a las industrias madereras, para que los precios de la madera reflejaran de forma más realista su coste real.

Este conjunto de medidas estaría destinado a reducir la utilización de los productos de los bosques en los insumos globales y para reducir la tasa de deforestación a niveles sostenibles.

Ninguna de estas medidas es imposible. Cada una de ellas está siendo adoptada en algún lugar del mundo, pero no en el mundo en su conjunto. Y de este modo los bosques continúan encogiéndose.

4. Las otras especies vivas

En la tierra puede haber entre 10 y 100 millones de especies vivas. Sólo 1,4 millones han sido catalogadas y clasificadas por los seres humanos. Dado que nadie sabe cuál es la magnitud real de las especies existentes, nadie puede saber cuántas se han perdido. Pero el número de extinciones es casi seguro que crece en forma exponencial. Eso se deduce de la tasa a la cual está desapareciendo el hábitat. Por ejemplo:

- Madagascar es un verdadero tesoro biótico; su bosque oriental alberga 12.000 especies de plantas conocidas y 190.000 especies conocidas de animales, un 60% de las cuales no se encuentran en ningún otro sitio de la tierra. Más del 90% de ese bosque ha sido eliminado. Los científicos estiman que al menos la mitad de las especies originales han desaparecido junto con él.

- El Ecuador occidental tuvo en el pasado entre 8.000 y 10.000 especies de plantas, la mitad de ellas endémicas. Cada especie de planta soporta a su turno entre 10 y 30 especies animales. Desde 1960 casi todo el bosque occidental de Ecuador se ha convertido en plantaciones de plátanos, pozos de petróleo y asentamientos humanos. El número de especies perdidas en sólo 25 años se estima en 50.000[39].

La mayor parte de las extinciones se da, como se podía esperar, donde se concentran las especies: es decir, en los bosques tropicales, arrecifes de coral y marismas. Las marismas posiblemente sufran más peligro que los bosques tropicales. Al igual que estos últimos, son sitios de intensa actividad biológica, incluida la cría de muchas especies de pescados. Sólo un 6% de la superficie de la tierra está constituida por marismas. Se estima que alrededor de la mitad de las marismas del mundo se han perdido por relleno, drenaje, dragado y canalización. Eso sin tener en cuenta lo que se puede haber degradado por la contaminación.

Las estimaciones de las tasas de extinción global comienzan con la medición de la pérdida de hábitat, que es bastante exacta. Prosiguen estimando qué número de especies podría haber en el hábitat perdido, y el factor de incertidumbre de dichas estimaciones es de 10. Luego establecen una relación entre la pérdida de hábitat y la pérdida de especies. La regla poco afinada es que el 50% de las especies quedarán aún cuando se pierda el 90% del hábitat.

Estos cálculos están sujetos a considerable controversia[40]. Pero, como con otras cifras que hemos intentado ajustar en otras partes de este capítulo, su dirección general está clara. Nadie duda de que las especies están desapareciendo a una tasa acelerada. Las estimaciones oscilan entre las 10 y las 100 especies perdidas cada día. Los ecologistas dicen que no se ha

registrado una ola semejante de extinción sobre la tierra desde los acontecimientos que eliminaron a los dinosaurios a finales de la era cretácica, hace 65 millones de años.

La pérdida de especies es una de las formas de medir el impacto humano sobre la biosfera. Otra forma de medirlo fue emprendida por los ecologistas en la Universidad de Stanford hace pocos años. Calcularon cuánto de la actividad biológica del planeta es apropiado para el uso de los seres humanos. Sus resultados son sorprendentes. Descubrieron que los humanos disponen del 25% de la producción fotosintética del planeta en su conjunto (terrestre y marítima), y del 40% del producto fotosintético sobre la superficie terrestre[41].

Esa cifra requiere algunas explicaciones. Los ecologistas definen la Producción Primaria Neta (PPN) de la biosfera como la cantidad de energía capturada de la luz del sol por la vegetación verde y fijada a los tejidos vivientes. El PPN es la base de todas las cadenas alimenticias. Todas las otras especies vivientes consumen plantas, o comen a alguna otra criatura que consume plantas, o comen a una criatura que a su vez come a otra que consume plantas. El PPN, por lo tanto, es el flujo de energía que propulsa a toda la naturaleza.

Los humanos consumen en forma directa sólo el 3% del PPN basado en la tierra, en forma de alimento, alimento animal y madera para combustible. Otro 36% del PPN se disipa indirectamente en los desperdicios de cosechas, quema de bosques y deforestación, desertización y conversión de zonas naturales en asentamientos humanos. Esos cálculos no incluyen la reducción de la producción primaria causada por la contaminación —ese efecto no se puede calcular aún sobre una base global—. Los humanos controlan alrededor del 40% del PPN de la tierra; los humanos pueden afectar bastante más que ese porcentaje a través de la contaminación.

Si la cifra del 40% es aproximadamente correcta, sin necesariamente ser exacta, plantea interesantes cuestiones acerca de la próxima duplicación de la población humana y de su actividad económica, a sólo 20 o 30 años de distancia. ¿Cómo será el mundo si los humanos llegaran a captar el 80% del PPN, o el 100%?

Nadie está seguro. Algunos ecologistas dicen que un mundo en el que los seres humanos usen el 100% del PPN tendrá la apariencia de Holanda o del Reino Unido: ausencia de vida salvaje real, el paisaje bajo control humano, muchas especies salvajes extinguidas, poco espacio para la expansión o los errores, pero un mundo en el que se podría vivir.

Otros señalan que Holanda y el Reino Unido importan alimentos, piensos, madera y fibras vegetales, y por lo tanto dependen en más de un 100% del PPN de su propio territorio[42].

Algunas naciones pueden hacer eso; el mundo en su conjunto no. Un mundo en el límite del PPN se puede asemejar al Sahel, afirman algunos ecologistas, o a China.

Una cosa es segura. A medida que los humanos toman para sí y para las formas de vida de su preferencia (como el maíz o las vacas) más de la productividad primaria de la tierra, dejan menos para otras formas de vida. El resultado es una pérdida de valor económico: especies de caza, peces, productos químicos, medicinas, alimentos, pueden estar desapareciendo junto con especies que nadie ha identificado. También se experimenta una pérdida estética y espiritual, una pérdida de pintorescos compañeros en la creación. Puede haber, por lo que se sabe, una pérdida de piezas críticas que mantienen unido al ecosistema. Hay ciertamente una pérdida de información genética que ha necesitado para evolucionar miles de millones de años —y que la humanidad está empezando a aprender cómo leer y utilizar.

En alguna fase de la apropiación del PPN residen los límites. Mucho antes de que se alcancen los límites últimos, la raza humana se verá empobrecida desde un punto de vista económico, científico, estético y moral.

Recursos no renovables

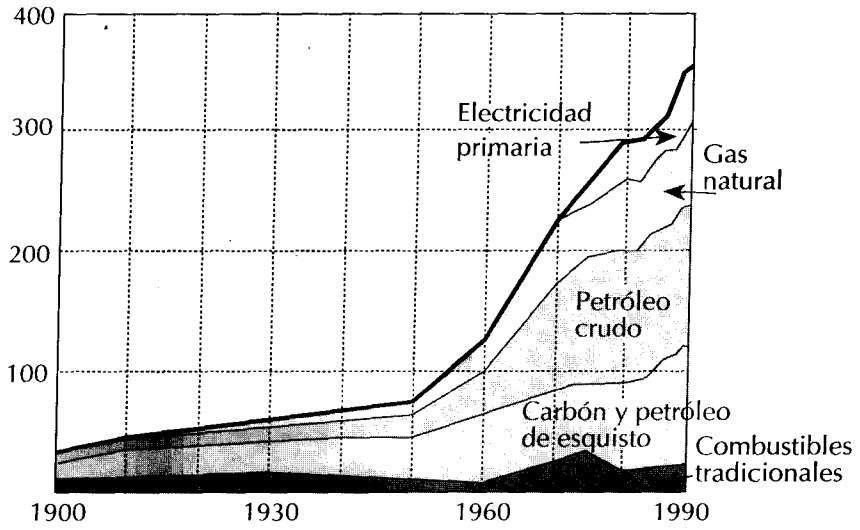
1. Combustibles fósiles

Los insumos totales de la economía humana han crecido entre 1860 y 1985 por un factor de 60. El consumo de la energía mundial ha seguido creciendo, en forma desigual pero inexorable, a través de las guerras, recesiones, inestabilidad de precios y cambios tecnológicos (ilustración 3-9). La mayor parte de la energía fluye a través del mundo industrializado. El promedio europeo utiliza entre 10 y 30 veces más energía comercial[43] que la población promedio en un país en desarrollo, y el promedio estadounidense usa 40 veces más[44].

La Conferencia sobre la Energía Mundial preveía en 1989 que un crecimiento a las tasas habituales de la población y el capital incrementaría la demanda mundial de energía en otro 75% para finales del año 2020, y que el conjunto de combustibles que proveen dicha energía seguirían

Ilustración 3-9 UTILIZACIÓN MUNDIAL DE LA ENERGÍA

Millones de terajoules por año



Las tasas de utilización de energía y la contribución relativa de distintas fuentes reflejan la evolución de la tecnología además del crecimiento de la población mundial. Pese a que los combustibles fósiles dominan la provisión de energía primaria, la participación del carbón alcanzó su máximo en torno a 1920, cuando constituía más del 70% del combustible consumido; la participación del petróleo alcanzó su máximo en torno a la década de 1970 con una aportación de poco más del 40%. El gas natural, que es menos contaminante que el petróleo y el carbón, se espera que contribuya más en el futuro al uso global de energía. La electricidad primaria en este gráfico incluye tanto la energía hidroeléctrica como la nuclear. (Fuentes: *Naciones Unidas*; *G. R. Davis*).

dominados por los combustibles fósiles no renovables: carbón, petróleo y gas[45]. En la actualidad el 88% de la energía comercial usada en el mundo procede de combustibles fósiles.

Entre 1970 y 1990 la economía mundial quemó 450.000 millones de barriles de petróleo, 90.000 millones de toneladas de carbón, y 1,1 billones de metros cúbicos de gas natural. En ese mismo periodo de veinte años, no obstante, fueron descubiertos nuevos depósitos de petróleo, carbón y gas (y algunos de los viejos fueron revaluados hacia arriba). Por lo tanto, y a pesar de que las tasas de consumo de combustibles fósiles son

Cuadro 3-1 PRODUCCIÓN ANUAL Y RELACIONES PRODUCCIÓN/RESERVAS PARA PETRÓLEO, CARBÓN Y GAS, EN 1970 Y 1989

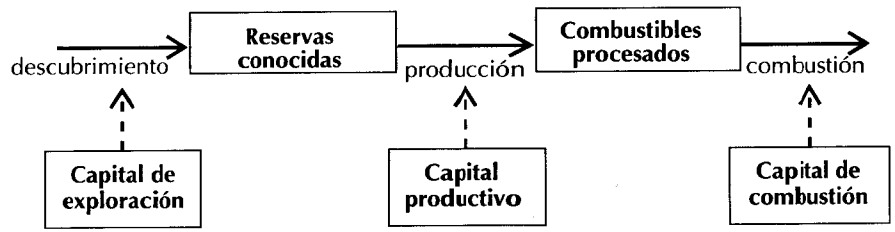
Combustible	Producción en 1970 (por año)		1970 P/R (años)	Producción en 1989 (por año)		1989 P/R (años)
Petróleo	16,7	miles de millones de barriles	31	21,4	miles de millones de barriles	41
Carbón	2,2	miles de millones de toneladas	2.300	5,2	miles de millones de toneladas	326 (hulla seca) 434 (hulla grasa)
Gas	0,850	billones de m^3	38	1,930	billones de m^3	60

mayores ahora de lo que eran en 1970, tal como se muestra en el cuadro 3-1, la relación de reservas conocidas respecto de la producción[46] (P/R, o el número de años que durarán los recursos conocidos si la producción se mantiene a la tasa actual) se ha elevado tanto para el petróleo como para el gas. La aparente caída en la relación P/R para el carbón proviene de métodos de estimación que no son comparables; como indica el cuadro, el carbón es con mucho el combustible fósil más abundante.

¿Significan acaso estas relaciones reserva/producción que había más combustibles fósiles a disposición de la economía humana en 1990 que en 1970?

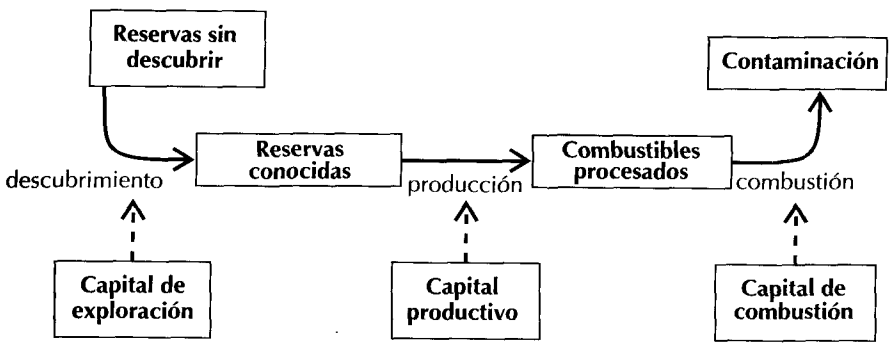
No, desde luego que no. Había 450.000 millones menos de petróleo, 90.000 millones de toneladas de carbón menos, y 1,1 billones menos de metros cúbicos de gas natural. Los combustibles fósiles son fuentes no renovables. Cuando son quemadas se convierten en dióxido de carbón, vapor de agua, dióxido de azufre y otros numerosos productos de la combustión que no vuelven —en una escala de interés humano— a combinarse para reconstituir combustibles fósiles. En lugar de ello constituyen desperdicios y elementos contaminantes que entran en los sumideros planetarios.

Aquellos que consideran los hallazgos de los últimos veinte años como prueba de que no hay límites a los combustibles fósiles están mirando a sólo una parte del sistema energético:



El proceso de *descubrimiento* usa capital de exploración (equipos de perforación, aviones, satélites, y una sofisticada gama de sondas y sistemas de sondeo) para encontrar depósitos de combustible fósil en la tierra y de esta forma incrementar las reservas que han sido identificadas pero no extraídas. El proceso de *producción* sustrae ese *stock* a la tierra, usando capital de minería, bombeo, transporte y refino, y lo envía a los sitios de almacenaje de combustibles procesados. Luego, el capital de *combustión* (hornos, automóviles, generadores eléctricos) quema el combustible[47].

Mientras la tasa de descubrimiento exceda la tasa de producción, el *stock* de reservas conocidas crece. Pero el diagrama anterior muestra sólo el aspecto económico del sistema, la parte que habitualmente la gente observa y mide. Un diagrama más completo incluiría las fuentes últimas y sumideros para los combustibles fósiles:



Como la producción reduce el *stock* de reservas conocidas, las empresas dedicadas a la explotación de energía invierten en la prospección para reponer recursos consumidos. Pero cada descubrimiento proviene del último *stock* disponible de combustible fósil de la tierra, que no se repone. El *stock* de reservas no descubiertas puede ser muy grande, pero es finito y no renovable y se encuentra en declinación.

En el otro extremo del flujo, la combustión produce elementos contaminantes que entran en el último sumidero disponible: los procesos biogeoquímicos del planeta, que reciclan los agentes contaminantes, o los hacen inocuos, o son envenenados por ellos. Otro tipo de contaminantes se genera en cada una de las fases del flujo de combustibles fósiles, desde el descubrimiento hasta la producción, refino, transporte y almacenamiento. (Una de las grandes fuentes

de contaminación del agua subterránea en Estados Unidos es, por ejemplo, la filtración hacia el subsuelo de los tanques de depósito de petróleo).

El flujo de combustibles fósiles está limitado tanto por las fuentes como por los sumideros, pero para diferentes combustibles el límite de fuente y sumidero difiere notoriamente en su severidad. Hay tal cantidad de carbón que su uso se verá limitado por los sumideros, especialmente por el ya desbordante sumidero atmosférico del dióxido de carbono. Los límites del petróleo comienzan a ser evidentes en ambos extremos. Su combustión produce gases de efecto invernadero y otros contaminantes, y será sin dudas el primer combustible fósil que se extinga en la fuente.

Las estimaciones de reservas de petróleo sin descubrir varían con amplitud y no pueden ser nunca precisas, pero en algunas regiones del mundo la depresión es ya crítica a los ojos de economistas y políticos (ver cuadro 3-2). En 1988 el 24% de la producción mundial de petróleo provenía del Próximo Oriente; y el 21%, de la ex URSS; estas dos regiones tienen alrededor del 72% de las reservas conocidas de petróleo y el 40% de las reservas estimadas no descubiertas.

El agotamiento del petróleo no se presentará como un cese repentino. Más bien, se presentará como un retorno cada vez más exiguo de los esfuerzos de exploración, aumentando la concentración de las reservas restantes en el Próximo Oriente, y finalmente un incremento y declinación gradual de la producción mundial. Estados Unidos es un caso de estudio de agotamiento del recurso. Su enorme caudal original de petróleo ha desaparecido en un 50%. Su producción interna alcanzó el máximo en torno a la década de 1960, y su demanda de petróleo debe satisfacerse cada vez más a través de las importaciones (ver ilustración 3-10).

De todos los combustibles fósiles, el gas natural emite la menor contaminación por unidad energética, y por lo tanto puede sustituir prestamente al carbón y petróleo en el futuro, lo que acelerará su propio agotamiento a un nivel que sorprenderá a aquellos que no aprecian en toda su magnitud la dinámica del crecimiento exponencial. Las ilustraciones 3-11 y 3-12 muestran el porqué.

En 1989 la relación mundial reserva/producción para el gas natural era de 60 años, lo que implica que si las actuales reservas conocidas continúan siendo utilizadas a los niveles de consumo de 1989, alcanzarán hasta el año 2.050. Dos cosas convierten a esa extrapolación en incorrecta. Una es que se descubrirán nuevas reservas. La otra es que la utilización futura no se mantendrá constante a las tasas de 1989.

Cuadro 3-2 RESERVAS MUNDIALES Y PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO, REGIONES Y NACIONES SELECCIONADAS

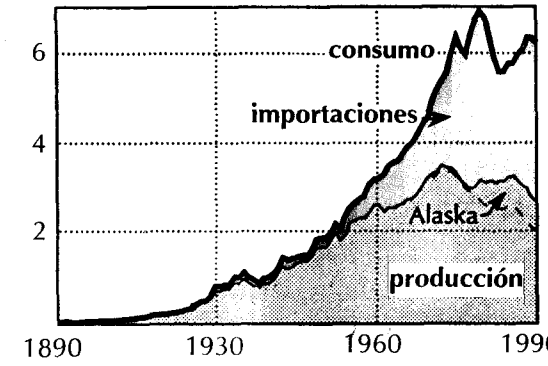
Región o nación	Producción acumulada hasta 1988	Producción de 1988	Reservas conocidas sin descubrir	Estimación de reservas
	miles de millones de barriles			
Mundo	610,1	21,3	922,1	275-945
Oriente Medio	160,2	5,1	584,8	66-199
URSS	103,6	4,5	80,0	46-187
EE UU	152,7	3,0	48,5	33-70
Asia	36,8	2,2	42,8	37-148
África	46,4	2,0	58,7	20-92
América del Sur	57,9	1,4	43,8	18-86
Europa Occidental	15,7	1,4	26,9	11-56
México	15,7	0,9	27,4	15-75
Canadá	14,3	0,5	7,0	9-57
Europa del Este	6,8	0,1	2,0	1-4

Supongamos, por razones ilustrativas, que suficiente gas recuperable será eventualmente descubierto para ser utilizado a la tasa de consumo de 1990 no por 60 años sino por 240 años. (Se trata de una estimación generosa. El consenso general es que las reservas sin descubrir serán a grandes rasgos del mismo tamaño que las reservas probadas actuales, y hay una tendencia sistemática a que las estimaciones de los recursos de combustible fósil sobrepasen los resultados reales que finalmente se obtienen[48]. Si la tasa de consumo de 1990 se mantuviera constante, las reservas de gas caerían en forma lineal, como queda representado por la línea diagonal en la ilustración 3-11, y durarían 240 años. Pero si el consumo continúa creciendo a la tasa en que ha crecido en los últimos veinte años, en torno al 3,5% anual, la reserva de 240 años caerá exponencialmente, como queda reflejado en la curva más gruesa de la ilustración 3-11. Se agotará no en el 2230, sino en el 2054; no durará 240 años, sino sólo 64 años.

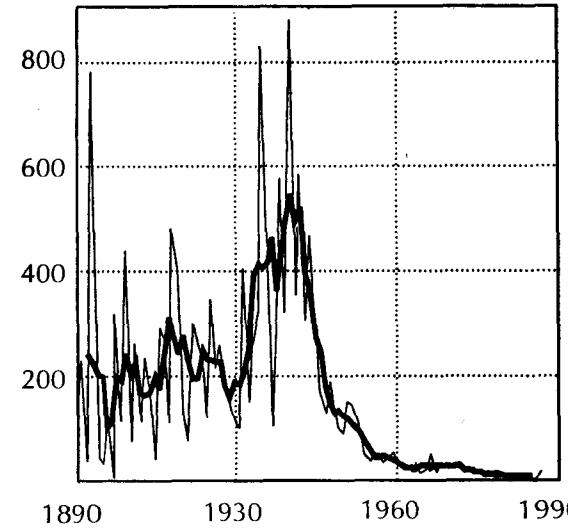
Si, para reducir algunas formas de contaminación y para evitar el agotamiento del petróleo, el mundo comienza a tirar del gas natural para soportar el peso de la energía que ahora se produce a expensas del petróleo y el carbón, la tasa de crecimiento bien podría ser superior al 3,5% anual. Si fuera del 5% anual, la "provisión de 240 años" se agotaría en 50 años.

Ilustración 3-10 HISTORIA DE LA PRODUCCIÓN Y EXPLORACIÓN PETROLERA DE ESTADOS UNIDOS

Miles de millones de barriles por año

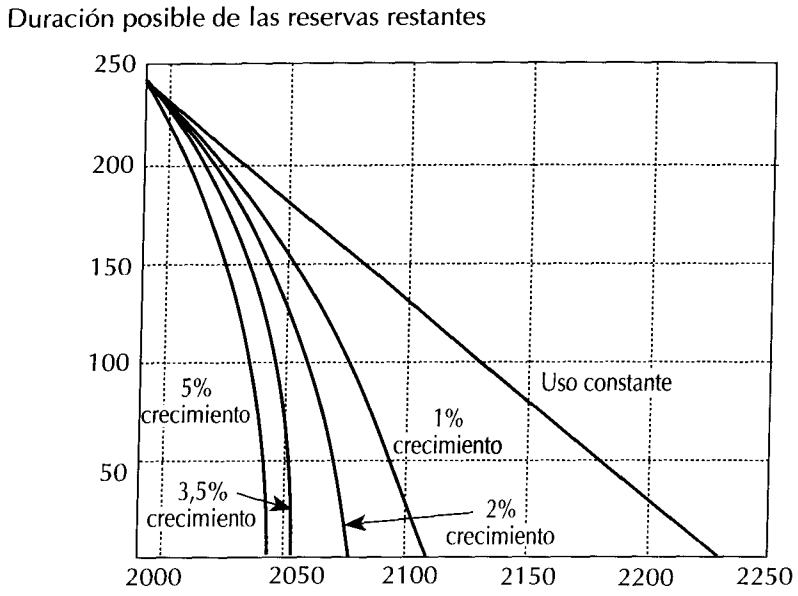


Barriles por pie perforado en los 48 Estados más australes



El agotamiento de las reservas de petróleo de Estados Unidos dio su primer indicio con la caída en el rendimiento de la exploración después de 1940. La producción interna estadounidense alcanzó su máximo en 1970, y la producción en los 48 Estados más australes del país ha caído desde entonces en un 40%. Aun con los nuevos descubrimientos en Alaska no se han logrado recuperar los niveles de producción de 1970. (Fuentes: *American Petroleum Institute*; *C. J. Cleveland et al.*).

Ilustración 3-11 AGOTAMIENTO DE LAS RESERVAS MUNDIALES DE GAS SUPONIENDO DIFERENTES TASAS DE CRECIMIENTO EN EL CONSUMO

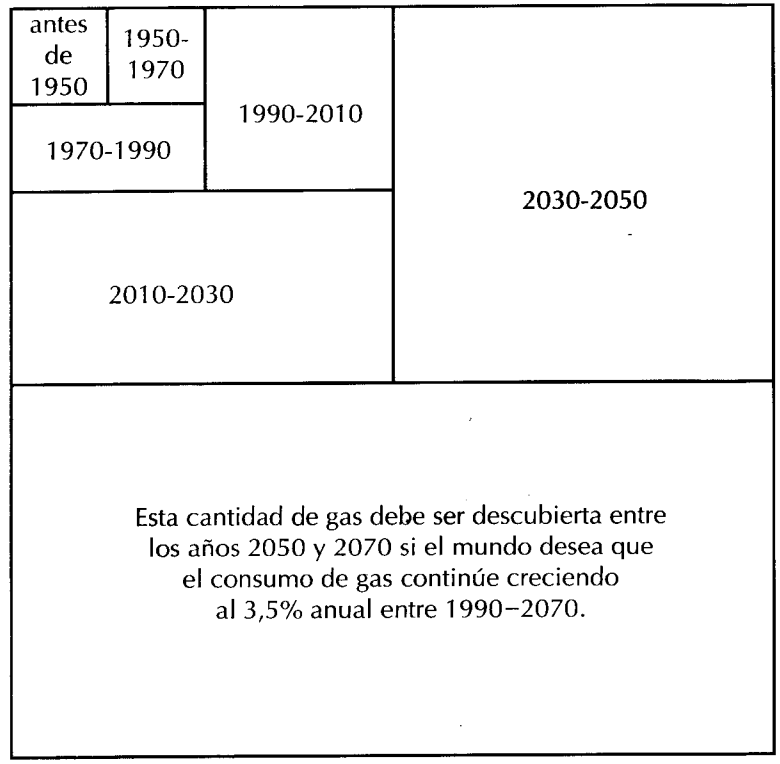


Si los descubrimientos eventualmente cuadruplican las actuales reservas globales de gas natural, la tasa actual de consumo de combustible puede sostenerse hasta el año 2230. Pero el agotamiento del petróleo combinado con problemas de medio ambiente del carbón podrían desplazar el peso hacia el gas. Si el consumo de gas continuara creciendo a su tasa actual del 3,5% anual, una cantidad de gas igual a cuatro veces las actuales reservas conocidas será consumida para el 2054.

La ilustración 3-12 muestra cómo deberían incrementarse los descubrimientos de forma que permitieran un crecimiento sostenido del consumo de gas del 3,5% anual. Por las matemáticas del crecimiento exponencial, la cantidad de gas descubierto debería duplicarse cada veinte años. Cada dos décadas se debería descubrir tanto gas como el que ha sido descubierto en toda la historia previa.

La cuestión no es que el mundo está al borde de quedarse sin gas natural. Las considerables reservas que quedan serán esenciales como combustible de transición en el camino hacia una fuente de energía más sostenible. El asunto es que los combustibles fósiles no son sostenibles, son sorprendentemente limitados, especialmente cuando se los usa en forma exponencial, y no se deben desperdiciar. En la escala de la historia humana, la era de los combustibles fósiles será un breve parpadeo, tanto por la limitación de sus fuentes como por los límites de sus sumideros. Una sociedad que expande la combustión de su capital en combustible fósil, sin planificar el futuro en función de sustitutos renovables, es susceptible de encontrarse repentinamente más allá de sus límites energéticos.

Ilustración 3-12 DESCUBRIMIENTOS NECESARIOS DE GAS PARA MANTENER UNA TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL 3,5%



Si la tasa de crecimiento del consumo de gas natural continúa en el 3,5% anual, eso quiere decir que cada veinte años se debe descubrir una cantidad de gas nuevo igual a toda la que fue descubierta en la historia previa. (Fuente: *A. A. Bartlett*).

Hay sustitutos renovables para los combustibles fósiles. No es necesario que llegue a haber una escasez global de energía. Están disponibles dos opciones de energía que son sostenibles en la fuente, soportables ambientalmente, técnicamente posibles y crecientemente

económicas. Una de ellas, mayor eficiencia, se puede implementar con rapidez. La otra, energías renovables de base solar, tomaría sólo un poco más de tiempo.

La eficiencia energética implica producir los mismos servicios energéticos finales —habitaciones con calefacción, iluminadas y refrigeradas, transporte para personas y carga, agua potable, motores en funcionamiento—, pero usando menos energía para esos objetivos. Supone la misma o mejor calidad de vida material, habitualmente a un menor coste —no sólo un menor coste directo energético, sino además menos contaminación, menos consumo de las fuentes internas de energía, menos conflicto sobre el emplazamiento de las plantas y, para muchas naciones, menos deuda externa y menos coste militar para mantener el acceso o controlar los recursos exteriores.

Las tecnologías de eficiencia, desde mejor aislación hasta coches más eficientes, mejoran con tal velocidad que las estimaciones de la energía requerida para alcanzar cualquier tarea deben ser revisadas a la baja cada año. Una lámpara fluorescente compacta dará la misma cantidad de luz que una incandescente, pero usará sólo un cuarto de electricidad que esta última. Las ventanas de aislamiento máximo, de utilizarse en todos los edificios de Estados Unidos, podrían ahorrar el doble de la energía que el país obtiene en la actualidad del petróleo de Alaska. Al menos 10 empresas fabricantes de automóviles han construido coches prototipo que pueden recorrer de 30 a 60 kilómetros con sólo un litro de gasolina, y el debate ahora se ha trasladado a la posibilidad de los 70 kilómetros por litro. En contra de la creencia popular, estos coches eficientes pasan todos los controles de seguridad, y algunos no son más caros de construir que los modelos actuales[49].

Los cálculos de cuánta energía puede ahorrarse a través de la eficiencia dependen de las predilecciones políticas y técnicas de las personas que hacen los cálculos. En el extremo conservador del espectro, parece seguro que la economía estadounidense podría hacer todo lo que hace ahora, con las tecnologías actualmente disponibles y a los costes actuales o inferiores, usando como mucho la mitad de la energía actual. Eso llevaría a EE UU a los actuales niveles de eficiencia de Europa Occidental y Japón, y reduciría el drenaje mundial de petróleo en un 14%, de carbón en un 10%, de gas en un 15%. Mejoras similares o mayores de la eficiencia son posibles en Europa del Este y en las naciones menos industrializadas.

Los optimistas dicen que eso es sólo el principio. Creen que Europa Occidental y Japón, las economías del mundo actualmente más eficientes en la utilización energética, podrían incrementar su eficiencia por un factor de entre 2 y 4 con tecnologías ya disponibles o fácilmente previsibles en los próximos veinte años. Algunos cálculos sugieren que con una mejoría de la eficiencia el mundo en su conjunto podría mantener sus insumos totales energéticos en los niveles actuales o por debajo de ellos, sin una reducción de la productividad, el confort o las ventajas en las naciones ricas, y con un crecimiento económico en las naciones pobres[50].

Una eficiencia de esa magnitud permitiría proveer la energía para todo el mundo desde una *fuente renovable de base solar*: sol, viento, hidroelectricidad, y biomasa como la madera, maíz o caña de azúcar. El sol vierte a diario mucha más energía sobre la tierra que la que los humanos pueden usar. El uso humano total del combustible fósil constituye un flujo de energía igual a cinco millones de vatios (teravatios). El flujo constante del sol hacia la superficie de la tierra representa 80.000 teravatios.

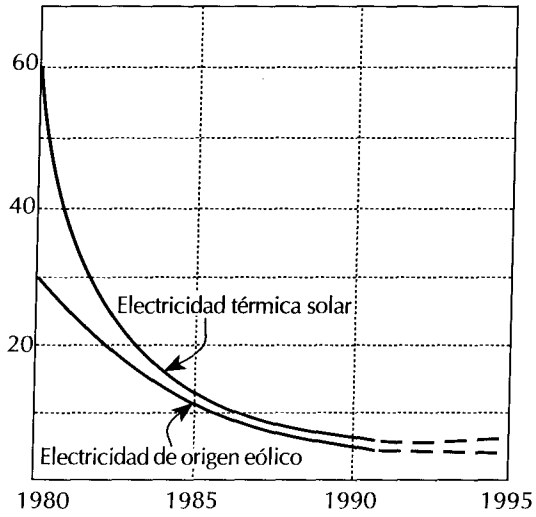
Los avances tecnológicos en materia de sistemas para la captura de energía solar han sido más lentos que los destinados a elevar la eficiencia, pero sin embargo han sido constantes. En 1970 la electricidad fotovoltaica se generaba a un coste de capital de 150 dólares por vatio. En 1990 el coste había caído a 4,50 dólares por vatio. Otra reducción de costes por un factor de 3 o 4 haría a la electricidad fotovoltaica competitiva con las plantas térmicas que utilizan carbón, aun sin computar los costes ambientales en el precio de la energía. En los países menos industrializados la electricidad fotovoltaica ya es competitiva para pueblos y proyectos de regadío que no pueden afrontar los costes de capital de conectarse a una red eléctrica distante.

La electricidad de generación térmico-solar y eólica en los emplazamientos apropiados ya es competitiva en costes (ilustración 3-13) y hay más tecnologías de esta naturaleza en el horizonte[51]. Estudios del Departamento de Energía de EE UU estiman que en el plazo de 40 años Estados Unidos podría obtener entre el 57% y el 70% de la energía total que utiliza actualmente del sol, viento, agua, geotermia y biomasa[52]. Ya que al menos la mitad de la energía que el país utiliza actualmente podría ser ahorrada con una mayor eficiencia, eso quiere decir que es posible un futuro basado en la energía totalmente renovable.

Las fuentes de energía renovable no son necesariamente inocuas para el medio ambiente y no son ilimitadas. Los molinos de viento requieren

Ilustración 3-13 COSTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ORIGEN SOLAR Y EÓLICO

Centavos de $ por kilovatio/hora



Entre 1980 y 1990 el coste de la electricidad generada por las centrales térmico-solares y por los molinos de viento ha caído por un factor mayor que 5. Ambas tecnologías son actualmente competitivas con la generación convencional de electricidad. (Fuente: *G. Heaton et al.*).

tierras y carreteras de acceso. Algunos tipos de células solares contienen materiales tóxicos. Las represas hidroeléctricas inundan las tierras y arruinan los cursos de agua de flujo libre.

La energía de biomasa es sólo sostenible en la medida en que lo son la agricultura o la explotación forestal que producen la biomasa. Algunas fuentes solares son diluidas e intermitentes y requieren amplias áreas de recolección y complejos mecanismos de almacenamiento,[53] y todos ellos requieren capital físico y una gestión cuidadosa. Por otra parte, las fuentes de energía renovable tienen una limitación de velocidad. Pueden fluir indefinidamente pero a un paso constante. No pueden soportar cualquier tamaño de población, ni el incremento indefinido del capital de plantas. Pero pueden proveer la energía básica para la sociedad sostenible del futuro. Son abundantes, muy difundidas y variadas. Sus flujos contaminantes asociados son menores y generalmente menos dañinos que los de los combustibles fósiles o nucleares.

No hay escasez de energía sobre la tierra. Si las fuentes menos contaminantes y más sostenibles son utilizadas con alta eficiencia, sería no sólo

posible, sino realizable, abastecer las necesidades de energía de la humanidad en forma sostenible. No es ésa la dirección que ha tomado en la mayoría de los países la política energética. Pero es una dirección realizable y beneficiosa para cualquier país que desee colocarse por debajo de los límites de sus insumos totales.

2. Materiales

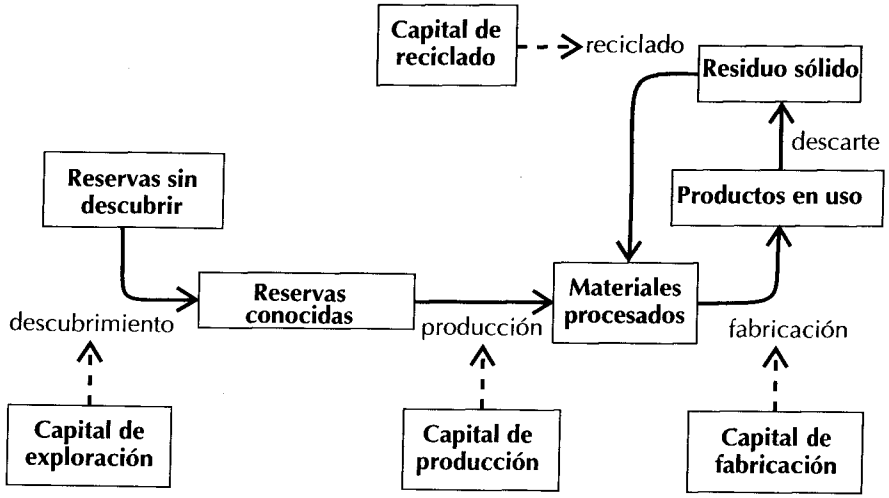
Sólo el 8% de la población mundial es propietaria de un coche. Muchas naciones planifican duplicar sus carreteras, colegios y hospitales. Cientos de millones de personas —nadie sabe exactamente cuántos— viven en viviendas inadecuadas o carecen de techo por completo, y mucho menos de luz, refrigeradores o equipos de televisión. Si va a haber más gente sobre el mundo, y si se espera que tengan mejores viviendas, servicios sanitarios, educación, coches, refrigeradores y televisión, necesitarán acero, cemento, cobre, aluminio, plástico y muchos otros materiales.

A veces uno oye hablar de una sociedad "posindustrial" que utilizará menos materiales, porque la economía consistirá de menos industria y más servicios. La idea no tiene en cuenta hasta dónde los servicios dependen de la base industrial y de los materiales traídos de todo el mundo. Amory Lovins escribió una vez sobre una máquina habitual del sector de servicios, una máquina de escribir (su descripción también se aplicaría a los ordenadores, impresoras láser y equipos de fax):

> La máquina de escribir que estoy utilizando ahora probablemente contiene aluminio de Jamaica o de Surinam, hierro sueco, magnesio checo, manganeso de Gabón, cromo de Rodesia, vanadio soviético, zinc peruano, níquel de Nueva Caledonia, cobre de Chile, estaño malayo, columbio nigeriano, cobalto de Zaire, plomo yugoslavo, molibdeno canadiense, arsénico francés, tantalio de Brasil, antimonio de Suráfrica, plata mexicana, y rastros de otros metales igualmente peregrinos. El esmalte puede contener titanio noruego, el plástico está fabricado con petróleo de Oriente Próximo (refinado con tierras raras de EE UU como catalizador) y cloro (extraído con mercurio español); la arena de la fundición proviene de una playa australiana; las herramientas usan tungsteno chino; el carbón provino del Ruhr; el producto final consume quizá demasiados pinos escandinavos[54].

La descripción es útil no sólo para señalar las rutas entretejidas a lo largo de las cuales la economía industrial mueve materiales, sino también para enfatizar que cada pieza de la máquina de escribir se originaba en la tierra. Una vez que ha pasado la vida útil de la máquina de escribir, lo más probable es que acabe en la tierra también.

La corriente de materiales de la tierra a través de la economías y de regreso a la tierra puede ser diagramada de la misma forma que el flujo de los combustibles fósiles, con una salvedad. A diferencia de los combustibles fósiles, materiales como los metales, el cemento, el plástico y el cristal no se transforman en gases de combustión tras su uso. O se acumulan en alguna parte como desperdicios sólidos, o se reutilizan por el reciclado, o se trituran y pulverizan, se destiñen, vaporizan, o se los dispersa por el suelo, el agua o el aire.



La ilustración 3-14 muestra la historia de la utilización de materiales por persona en un país que supuestamente se desplaza hacia una modalidad posindustrial, Estados Unidos. Refleja dos aspectos: que la utilización de materiales se mueve al compás del ciclo económico, y que la utilización de materiales por persona se nivela. Hay un límite a la cantidad de acero, cemento y cobre que incluso la gente rica puede introducir en su vida.

Ese límite, no obstante, es alto, al menos si el estilo de vida estadounidense debe considerarse como modelo para el resto del mundo. Para la mayor parte de los metales, la tasa de uso promedio de una persona en el

mundo industrializado es de 8 a 10 veces la tasa de uso de las personas en el mundo no industrializado. Si una población de 12.500 millones de personas consumiera en su conjunto materiales a la tasa de consumo promedio de finales del siglo XX en EE UU, se requeriría un incremento en la producción de acero mundial por un factor de 7, cobre por un factor de 11, y aluminio por un factor de 12.

La mayoría de la gente tiene la impresión de que tal flujo de materiales no es posible ni necesario. No es posible a causa de los límites de las fuentes terrestres y sus sumideros; y porque, en todo el trayecto entre las fuentes y los sumideros, el procesamiento, fabricación, manipulación y uso de los materiales deja un sendero de contaminación. No es necesario porque los insumos globales por persona en las naciones ricas de finales del siglo XX, como sus alimentos, su agua, madera e insumos energéticos, están incursos en el desperdicio y el exceso. Una buena vida podría ser soportada con mucha menos destrucción del planeta.

Hay signos de que el mundo está aprendiendo esa lección. La ilustración 3-15 muestra el consumo mundial de metales entre 1930 y 1988. Algo ocurrió a mediados de la década de 1970 para interrumpir lo que hasta entonces había sido una tendencia hacia el crecimiento exponencial. Hay diversas teorías sobre lo que efectivamente ocurrió, todas ellas probablemente correctas:

- La crisis de los precios petroleros de 1973 y de 1979 desembocaron en un fuerte incremento de los precios de los productos con alto insumo energético, lo que determinó que alguna gente no pudiera hacer frente a productos con uso intensivo de metales.

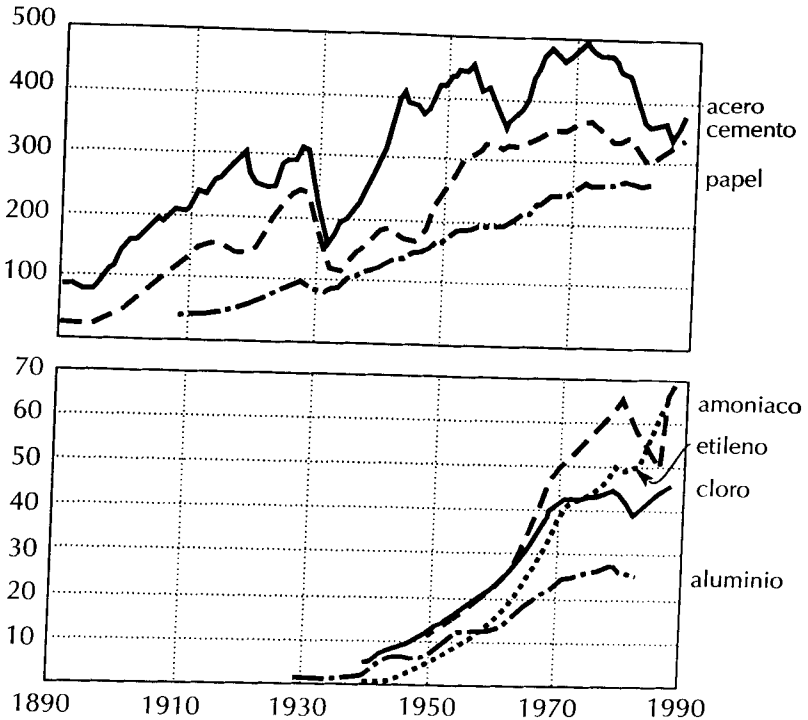
- Los mismos altos precios, además de leyes para la protección del medio ambiente y el problema de disponer de los residuos sólidos, alentaron el reciclado de materiales.

- Esas presiones trajeron consigo una revolución técnica; plásticos, cerámicas y otros materiales sustituyeron a los metales. Los productos, desde los automóviles hasta las latas de bebidas gaseosas, se hicieron más livianos.

- La caída de la economía a comienzos de la década de 1980 redujo la demanda de materiales.

Ilustración 3-14 TENDENCIAS EN EL CONSUMO ESTADOUNIDENSE DE MATERIALES

Kilogramos por persona al año



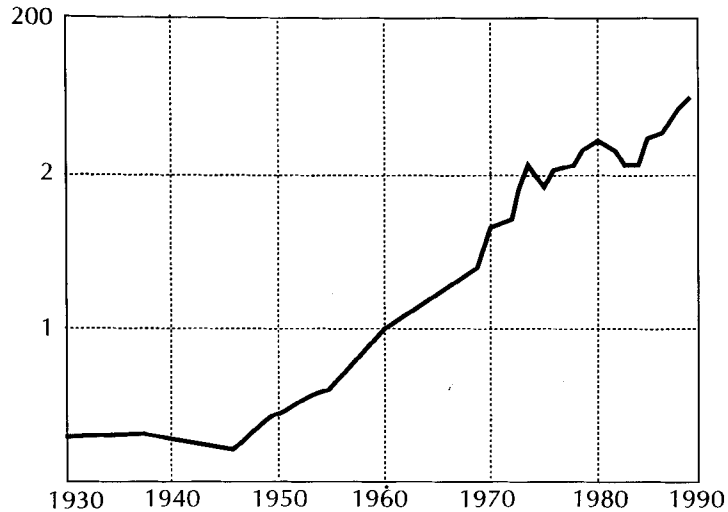
Las tendencias en el consumo *per cápita* de siete materiales ejemplifican la utilización promedio de materiales básicos en Estados Unidos. Entre los siete hay tres materiales "tradicionales": acero, cemento y papel. Los otros materiales "modernos" son: aluminio, amoniaco, cloro y etileno. El uso *per cápita* de los materiales tradicionales se ha nivelado, con excepción de las alteraciones de los ciclos económicos. La utilización *per cápita* de los nuevos materiales se ha elevado continuamente hasta la declinación económica de comienzos de la década de 1980. (Fuentes: *E. Larson et al.*; *U. S. Bureau of the Census*; *Naciones Unidas*).

- Durante esa baja del ciclo económico los sectores de las manufacturas pesadas fueron los más deprimidos, con lo cual la demanda de metales básicos se redujo en forma desproporcionada[55].

Las razones económicas para el menor crecimiento en el consumo de materiales pueden ser temporales; los cambios técnicos serán seguramente

Ilustración 3-15 CONSUMO MUNDIAL DE METALES

Miles de millones de toneladas métricas/año



El consumo mundial de metales arrojó un ligero descenso durante la recesión económica de principios de los años 80, pero luego se sostuvo en aumento. Desde los años 70, su crecimiento viene siendo más lineal que exponencial.

permanentes, al igual que las presiones para reducir el flujo de materiales hacia el medio ambiente. Las comunidades pobres siempre han recuperado y reutilizado los materiales debido a la escasez de fuentes. Las comunidades están reaprendiendo cómo reciclar los materiales debido a la escasez de sumideros. En este proceso han convertido al proceso de reciclado, de una actividad intensiva en mano de obra, en una actividad intensiva en capital y energía. Se utilizan máquinas para remover el abono compuesto, sistemas de dispersión y cubierta, sistemas de digestión, mezcladoras de lodo, y se contratan empresas de gestión para diseñar los programas de recuperación de desperdicios para industrias o ayuntamientos.

Los industriales con visión de futuro están diseñando productos, desde teteras hasta coches, teniendo en cuenta el desguace y reciclado final de los materiales. Un nuevo modelo de coche de la BMW tiene una carrocería de plástico diseñada para un reciclado fácil. Los plásticos ahora vienen marcados con su tipo de resina, y hay pocos tipos que se mezclen entre sí, de forma tal que puedan ser separados y reutilizados.

Separar y reciclar materiales después de su uso es un paso más hacia la sostenibilidad. Comienza a mover los materiales a través de la economía humana de la forma en que se mueven a través de la naturaleza: en ciclos. En la naturaleza, el desperdicio de un proceso se convierte en el insumo de otro proceso. Sectores íntegros de los ecosistemas, particularmente en los suelos, trabajan para separar los materiales de los desperdicios de la naturaleza, aislarlos en trozos utilizables, y enviarlos de regreso como formas vivas nuevamente. La moderna economía humana está finalmente desarrollando también un sector de reciclado.

Pero reciclar la basura es hacerse cargo del último y menos problemático escalón del flujo de materiales. Una regla poco afinada estima que cada tonelada de basura en el extremo consumidor del flujo ha requerido además la producción de cinco toneladas de desperdicio en el proceso de manufactura y 20 toneladas de desechos en el punto de la extracción inicial (minería, bombeo, tala, granja)[56]. La mejor forma de reducir dichos flujos de desechos es reducir el flujo de materiales desde la fuente.

El incremento de la vida útil de los productos a través de un mejor diseño, reparación y reutilización (como, por ejemplo, la utilización de botellas retornables y el lavado de copas en lugar de usar las descartables) es más efectivo que reciclar, porque no requiere aplastar, moler, derretir, purificar y volver a fabricar los productos reciclados. Duplicar la vida útil de cualquier producto reduce a la mitad el consumo de energía, la generación de desechos y la contaminación, y el agotamiento último de todos los materiales utilizados en su fabricación.

La reducción en la fuente supone encontrar una forma de desarrollar el mismo trabajo con menos material. Es el equivalente a la eficiencia energética y, al igual que la eficiencia energética, sus posibilidades son enormes. En 1970 un coche típico americano pesaba 4.000 libras, casi todo en metal. Ahora el peso de un coche promedio es de 2.400 libras, 180 de las cuales son plásticos. Los circuitos de los ordenadores se basan en diminutos *chips* de silicona en lugar de los pesados núcleos ferromagnéticos. Un pequeño disco compacto soporta tanta música como dos grandes discos de vinilo. Una fibra óptica de cristal puro del grosor de un cabello puede transportar tantas llamadas de teléfono como 625 cables de cobre y con una mejor calidad de sonido.

En lugar de las altas temperaturas, severas presiones, productos químicos irritantes y la fuerza bruta, que han caracterizado los procesos de manufactura desde el comienzo de la revolución industrial, los científicos

están comenzando a comprender cómo utilizar la inteligencia de las máquinas moleculares y de la programación genética. Los avances en la nanotecnología y biotecnología han comenzado a permitir a la industria desarrollar reacciones químicas de la misma forma que se desarrollan en la naturaleza, ensamblando cuidadosamente molécula con molécula[57].

Las posibilidades del reciclado, la mayor eficiencia, el incremento en la vida de los productos y reducción en la fuente, en el mundo de los materiales, son excitantes. A una escala global, no obstante, no han reducido todavía el vasto flujo material a través de la economía. En el mejor de los casos han reducido su tasa de crecimiento. Miles de millones de personas entretanto todavía ansían coches y refrigeradores, y esos miles de millones crecen en forma exponencial. A pesar de que la mayor parte de la gente en la década de 1990 es más consciente de los límites de los sumideros que de los límites de las fuentes para los insumos materiales, el crecimiento continuado de la demanda material también se enfrentará con el tiempo con el límite de las fuentes. Muchos de los materiales más útiles para la sociedad humana sólo se dan accidentalmente en la concentración adecuada sobre la superficie de la tierra, y su ritmo de extracción los está llevando al agotamiento al igual que a los combustibles fósiles.

El geólogo Earl Cook representó una vez con un cuadro cuán poco concentrados y cuán raros son la mayoría de los minerales[58]. Comparó el *tenor de límite* de los minerales metálicos comunes con su concentración en las rocas habituales. Por "tenor de límite" se entiende el grado de concentración más bajo al cual la extracción de mineral sigue siendo rentable. Para cualquier mineral el tenor de límite puede descender si el capital, la energía y la tecnología permiten el procesamiento de minerales menos concentrados, o si su precio sube. Pero el cuadro 3-3 muestra que el tenor de límite debería reducirse por factores de varios cientos o varios miles antes de que la mera roca sea explotable para la mayoría de los minerales. Nunca se podrá hacer frente a la energía necesaria para procesar concentraciones de minerales tan diluidas, y mucho menos hacerlas soportables desde el punto de vista del medio ambiente.

El cuadro muestra que el hierro y el aluminio, y posiblemente el titanio, son realmente abundantes sobre la corteza terrestre. Desde el punto de vista de las fuentes esos tres minerales pueden considerarse esencialmente ilimitados. Los otros minerales son, como los combustibles fósiles, escasos y preciosos, formados por procesos geológicos de tremenda fuerza a lo largo de millones de años, no son renovables, y se van agotando a paso regular.

Cuadro 3-3 MINERALES DE IMPORTANCIA ECONÓMICA: RELACIONES DE TENOR EXPLOTABLE CON LA ABUNDANCIA CORTICAL MEDIA

Elemento	Abundancia cortical (%)	Tenor límite explotable (%)	Relación
Mercurio	0,0000089	0,1	11.200
Tungsteno	0,00011	0,45	4.000
Plomo	0,0012	4	3.300
Cromo	0,011	23	2.100
Estaño	0,00017	0,35	2.000
Plata	0,0000075	0,01	1.330
Oro	0,00000035	0,00035	1.000
Molibdeno	0,000132	0,1	770
Zinc	0,0094	3,5	370
Manganeso	0,13	25	190
Níquel	0,0089	0,9	100
Cobalto	0,0025	0,2	80
Fósforo	0,12	8,8	70
Cobre	0,0063	0,35	56
Titanio	0,64	10	16
Hierro	5,820	20	3,4
Aluminio	8,3	18,5	2,2

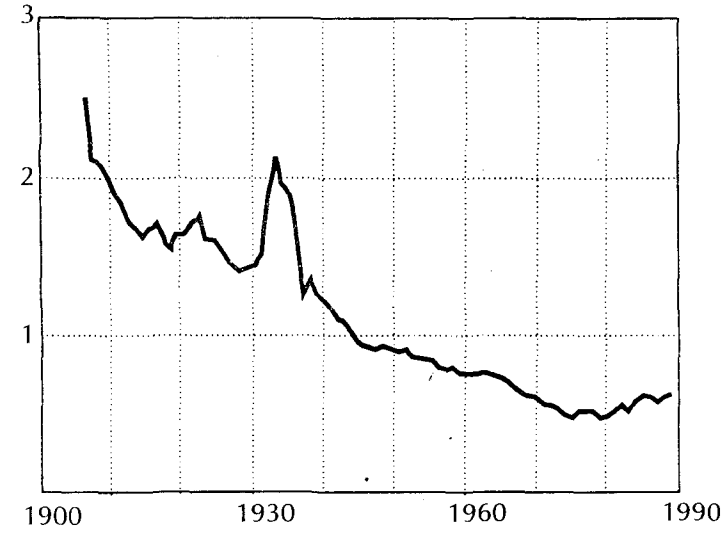
La ilustración 3-16 muestra cómo podría ser el agotamiento de los minerales, la concentración decreciente de los productos minerales. La ilustración 3-17 muestra la consecuencia del agotamiento. A medida que la cantidad utilizable de metal en los minerales baja del 1%, la cantidad de roca que debe ser extraída, molida y tratada por tonelada de producto se eleva con una velocidad sorprendente.

Como el tenor promedio de cobre explotado en Butte, Montana, cayó del 30% al 0,05%, los desechos resultantes de la producción de una tonelada de cobre crecieron de tres toneladas a 200 toneladas. Esta curva ascendente de residuos es seguida de cerca por la curva ascendente de consumo de energía necesaria para producir cada tonelada de material final. El agotamiento del mineral metálico acelera el agotamiento de los combustibles fósiles.

La economía mundial utiliza cada año alrededor de 2.000 millones de toneladas de minerales no combustibles. Esa alta tasa de flujo material reduce la concentración de los minerales, incrementa el uso de energía y el desperdicio en la producción, llena fosos y emite contaminantes en

Ilustración 3-16 CALIDAD DECRECIENTE DEL MINERAL DE COBRE EXTRAÍDO EN EE UU, 1906-1990

Porcentaje del cobre en el mineral



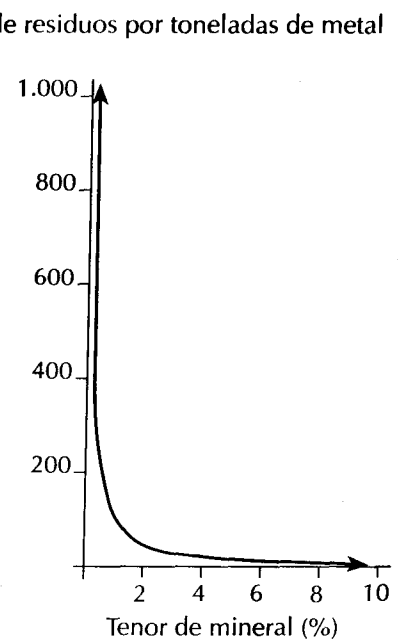
Los minerales con un tenor de entre el 2% y el 2,5% de cobre se extraían en Estados Unidos antes de 1910. Desde entonces ha habido un persistente descenso en el tenor promedio. El pico registrado en la década de 1930 y el leve ascenso en la década de 1980 fueron ocasionados por caídas de la actividad económica que cerraron las minas marginales y dejaron en funcionamiento sólo aquéllas con el mineral más rico. (Fuente: *U. S. Bureau of Mines*).

todo el proceso. Aun en el caso en que no se registrara más crecimiento, las tasas actuales de utilización material serían insostenibles a largo plazo. Si se aspira a que una creciente población mundial viva en medio de la suficiencia material en el futuro, todas las reducciones de la extracción en la fuente y las tecnologías de reciclado que se encuentran ahora en el horizonte se necesitarán con urgencia. Los materiales serán tratados como los dones preciosos y limitados de la tierra que son en realidad. La idea de la "sociedad descartable" se hará obsoleta.

Sumideros para contaminación y residuos

En la época de la Conferencia de Estocolmo de 1972 sobre el Medio Ambiente no había nada más que 10 naciones con ministerios o agencias

Ilustración 3-17 EL AGOTAMIENTO DE LOS TENORES DE MINERAL INCREMENTA SENSIBLEMENTE LOS RESIDUOS MINEROS GENERADOS EN SU PRODUCCIÓN



A medida que decae el tenor de mineral por agotamiento del 8% al 3%, hay un incremento escasamente perceptible en la cantidad de residuos de la minería generados por tonelada de metal final. Por debajo de una concentración del 3% los residuos por tonelada crecen en forma dramática. Eventualmente, el coste de disponer de los residuos excederá el valor del metal producido.

del medio ambiente. Ahora hay bastante más de un centenar. La actividad de estas nuevas instituciones de protección del medio ambiente durante estos primeros veinte años ha sido irregular. Sería demasiado simple concluir que el mundo ha resuelto sus problemas de contaminación, o que no ha habido ningún progreso.

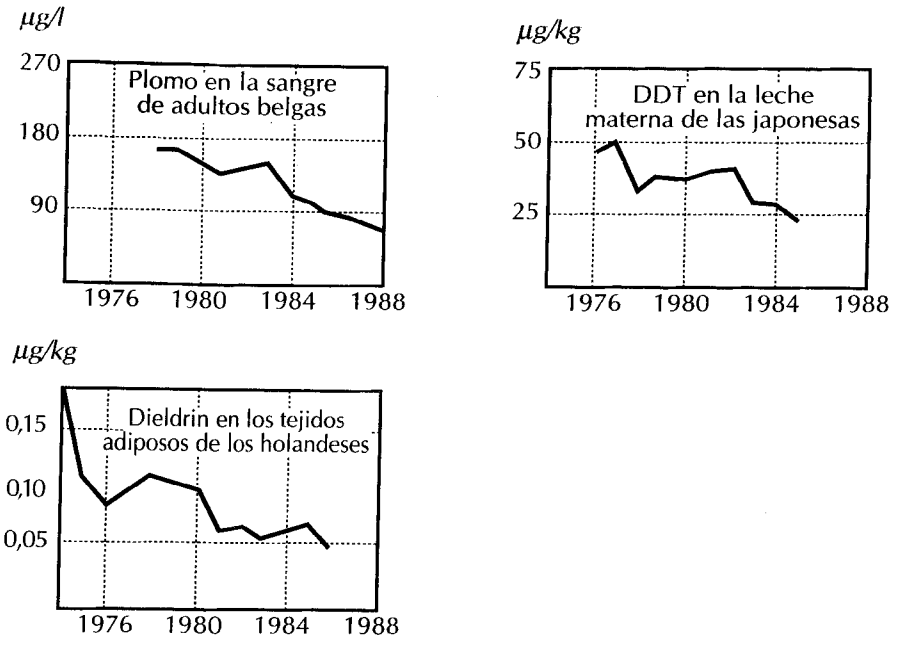
Los éxitos más grandes provienen de la identificación y prohibición de los elementos tóxicos para la salud humana. La ilustración 3-18 muestra por ejemplo que, desde que el uso del plomo en la gasolina, y los pesticidas DDT y dieldrin fueron prohibidos en Bélgica, Japón y Holanda, respectivamente, sus niveles en el medio ambiente y en los tejidos humanos se han reducido. Poblaciones de aves que sufrían problemas de reproducción debido al DDT han comenzado a recuperarse.

En las naciones industrializadas, después de determinados esfuerzos y considerables gastos, se ha registrado un éxito parcial en la reducción de, no todos, pero sí parte de los contaminantes del aire y del agua. La ilustración 3-19 muestra que en las naciones del Grupo de los Siete (G7)[59] las emisiones de dióxido de azufre se han reducido en casi un 40% mediante el uso de elementos adecuados en las chimeneas industriales y el cambio a combustibles con bajo contenido de azufre. Los contaminantes dióxido de carbono y óxido de nitrógeno son químicamente difíciles de eliminar; se han mantenido constantes a grandes rasgos durante veinte años, a pesar del crecimiento económico, fundamentalmente a causa de las mejoras en la eficiencia energética.

La historia de los agentes contaminantes en el río Rin brinda un ejemplo de los triunfos y desengaños en la labor de controlar la contaminación del agua. Los niveles de oxígeno en el Rin han mejorado notablemente (ilustración 3-20), principalmente a causa de las inversiones en los sistemas de tratamiento de desagües. El metal pesado tóxico cadmio ha cesado de crecer en forma exponencial por una reglamentación más estricta contra la eliminación de sus residuos en el Rin, pero ahora se filtra a través de los sedimentos del fondo y no se degrada químicamente, por lo que mantiene altos niveles. Los niveles de cloro siguen siendo altos por dificultades políticas; las naciones que se encuentran en el curso inferior del río no han logrado formas efectivas de presionar en contra de la principal fuente de cloro, que son las minas de sal de Alsacia. El nitrógeno proviene del drenaje de fertilizantes desde las tierras de laboreo. Sus fuentes están demasiado dispersas como para ser reunidas en un solo sistema de tratamiento de desagües. De la única forma que se puede reducir es mediante la modificación de los sistemas de producción agrícolas a lo largo de toda la cuenca del Rin.

Las naciones industrializadas se las han arreglado para reducir en forma sustancial algunos de los elementos contaminantes más visibles y fácilmente manipulables (como las partículas de hollín). A otros los han mantenido a raya a pesar de un fuerte incremento en las fuentes de emisión. Estados Unidos, por ejemplo, ha gastado 100 millones de dólares en depuradoras de agua a lo largo de veinte años. Ha reducido a la mitad la cantidad de contaminación orgánica por volumen de los efluvios municipales, pero la cantidad de efluvios municipales se ha duplicado, de tal forma que la calidad del agua se mantiene a grandes rasgos igual[60]. En los últimos veinte años California ha reducido las emisiones por coche entre un 80% y un 90%. En el mismo lapso de tiempo, sin embargo, el número de coches se ha elevado un 50% y el número de kilómetros recorridos por los vehículos ha crecido en un 65%[61].

Ilustración 3-18 CONTAMINACIÓN HUMANA DECRECIENTE POR DDT, DIELDRIN Y PLOMO EN TRES PAÍSES

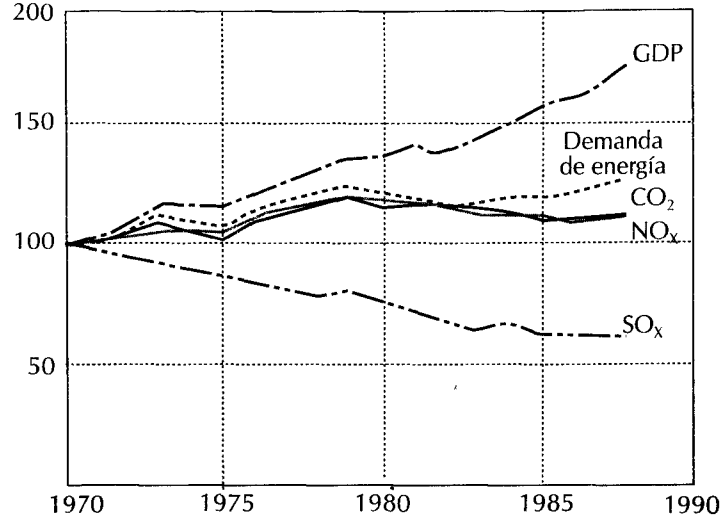


Las mejoras del medio ambiente más espectaculares se han producido por la prohibición directa de sustancias tóxicas como el plomo en la gasolina (Bélgica) y los pesticidas DDT (en Japón) y dieldrin (en Holanda). (Fuentes: *Programa de Medio Ambiente de las Naciones Unidas*; *G. Ducoffre et al.*).

El Instituto de Salud Pública y Protección del Medio Ambiente de Holanda estima que para mejorar la situación actual de mantener a raya los agentes contaminantes, y parar el daño a los suelos y las aguas de Holanda, las emisiones de dióxido de azufre deben ser reducidas en un 90% más, los óxidos de nitrógeno un 70%, el amoniaco un 80% y el fósforo un 75%[62]. El Instituto afirma: "Si se usan en forma creciente las opciones tecnológicas dentro del plazo de tiempo disponible, parece inevitable una reorientación fundamental de nuestras expectativas acerca de la naturaleza y la dimensión del crecimiento económico"[63].

Ése es el récord en naciones con dinero para gastar en la eliminación de la contaminación. En la actualidad los peores niveles de contaminación del agua y del aire se encuentran en Europa del Este y en el Tercer

Ilustración 3-19 TENDENCIAS EN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE SELECCIONADOS



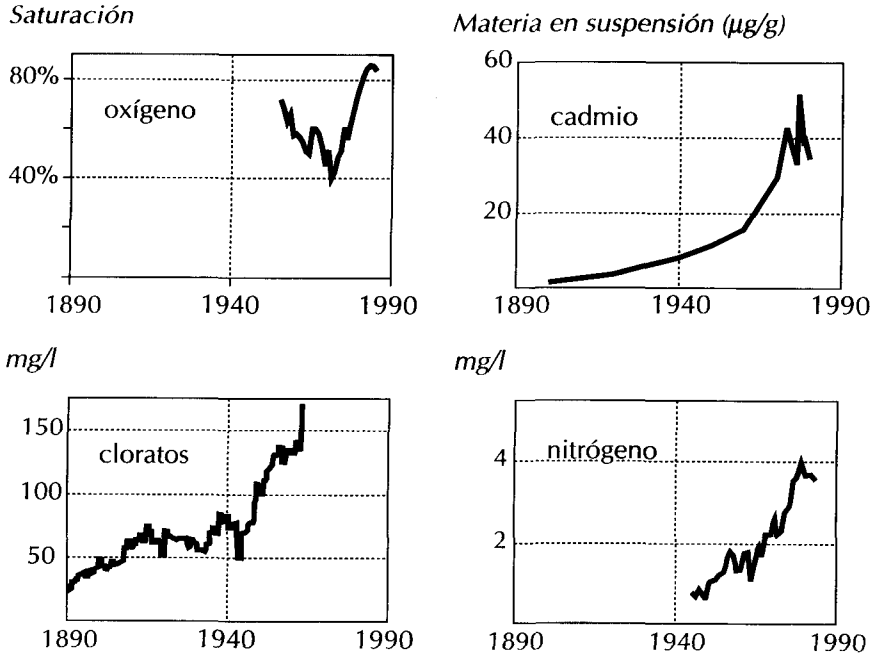
Los países del G7 han hecho esfuerzos significativos para lograr una mayor eficiencia de la energía y el control de las emisiones. Pese a que sus economías han crecido casi un 60% desde 1970, sus emisiones de CO_2 y NO_x se han mantenido casi constantes (fundamentalmente por la eficacia energética) y sus emisiones de óxidos de azufre han decrecido en un 40% (debido tanto a la eficiencia energética como a las tecnologías activas de abatimiento). (Fuente: *OCDE*).

Mundo, donde es inimaginable la inversión de miles de millones de dólares para abatir esa amenaza. Y eso es lo que se ha hecho con un tipo de agentes contaminantes que son química y políticamente fáciles de abatir.

Los contaminantes más intratables, al menos hasta el momento, son los residuos nucleares, residuos de riesgo, y residuos que amenazan los procesos bioquímicos globales, como los gases del efecto invernadero. Químicamente son los más difíciles de secuestrar o detoxificar, fisiológicamente los más difíciles de detectar por los sentidos, y económica y políticamente los más difíciles de regular.

Ninguna nación ha resuelto el problema de los residuos nucleares. Son peligrosos para todas las formas de vida, ya sea por su toxicidad directa o por la capacidad de generar mutaciones. La naturaleza no tiene forma de hacerlos inocuos. Se desintegran de acuerdo con su propio reloj inter-

Ilustración 3-20 CONTAMINACIÓN EN EL RÍO RIN



Los datos sobre el río Rin muestran algún éxito y algún fracaso en el control de la contaminación. Las plantas de tratamiento de desagües han incrementado los niveles de oxígeno hasta casi la normalidad. Los niveles de cadmio se han reducido en un cuarto desde su máximo a finales de la década de 1970, pero siguen siendo altos. El cloro de los desechos de la minería y el nitrógeno de las filtraciones de fertilizantes no han sufrido una mejoría significativa. (Fuentes: *K. Mall*; *World Resources Institute*; *I. F. Langeweg*).

no, que según los casos puede ser de décadas, siglos o incluso milenios. Como subproductos de la generación de energía mediante la fuerza nuclear se acumulan exponencialmente, se almacenan bajo tierra o en piscinas de agua dentro de las cámaras de contención de los reactores nucleares, con la esperanza de que algún día la creatividad técnica e institucional de la humanidad encuentre algún lugar donde guardarlos.

Los residuos más intratables y de mayor riesgo son los productos químicos sintetizados por el hombre. Como nunca antes habían existido sobre el planeta, no se han desarrollado organismos capaces de desintegrarlos y hacerlos inocuos.

En la actualidad hay un total de 65.000 productos químicos industriales en el uso comercial habitual. Los datos toxicológicos están disponibles sólo para aproximadamente el 1% del total. Cada día entran al mercado entre tres y cinco nuevos productos químicos. Un 80% de esos productos no son probados antes para ver su toxicidad[64]. Cada día, un millón de toneladas de residuos peligrosos se generan en el mundo, un 90% de ellos en el mundo industrializado. En un día promedio en Estados Unidos hay cinco accidentes industriales que implican residuos peligrosos[65]. Recientemente, Noruega ha encontrado 7.000 emplazamientos donde el suelo está contaminado con agentes químicos y metales peligrosos; el gobierno estima que su eliminación costará entre 3.000 y 6.000 millones de dólares[66]. A medida que las naciones industrializadas comienzan a encontrar suelos y aguas subterráneas contaminadas por décadas de vertidos químicos irresponsables, se registra una creciente presión en las naciones en vías de industrialización del Sur para aceptar procesos de manufactura o vertidos de residuos que ya no se consideran tolerables en el Norte.

Luego están los elementos que contaminan los grandes flujos de energía y materiales de la tierra en su conjunto. Estos contaminantes globales, sin importar quién los genera, afectan a todos. El ejemplo más dramático de contaminante global ha sido el efecto de los agentes químicos industriales denominados clorofluorocarbonos sobre la capa de ozono de la estratosfera. La historia del ozono es fascinante, porque ilustra la primera confrontación sin ambigüedades de la humanidad con un límite global. La consideramos tan importante que se relata en forma extensa en el capítulo 5.

Muchos científicos consideran que el siguiente límite global con el que la humanidad deberá enfrentarse es el denominado efecto invernadero, o la trampa de calor, o el cambio global del clima.

Los científicos saben desde hace un siglo que el dióxido de carbono atrapa calor e incrementa la temperatura de la tierra, como una manta, o con mayor exactitud como un invernadero que permite que entre la energía solar pero impide que salga. Este "efecto invernadero" es un fenómeno natural, y un fenómeno beneficioso, que calienta la tierra y la hace habitable. Pero el excesivo calentamiento, producido por el dióxido de carbono generado por los procesos humanos a partir del combustible fósil y la deforestación, puede ocasionar un cambio global del clima. En los últimos veinte años se ha descubierto que otros gases de invernadero emitidos por la actividad humana también crecen en forma exponencial en la atmósfera: metano, óxido nitroso y los mismos clorofluorocarbonos que amenazan la capa de ozono (ilustración 3-21).

El cambio global del clima no puede detectarse en forma rápida, porque el tiempo, de día a día y de año a año, es naturalmente variable. El clima es el promedio a largo plazo del tiempo; por lo tanto sólo puede ser medido a lo largo de décadas. Evidencias de calentamiento, sin embargo, empiezan a acumularse. Los ocho años más cálidos (en promedio global) del siglo han sido 1980, 1989, 1981, 1983, 1987, 1988, 1991 y 1990 (ilustración 3-22). Los estudios a largo plazo de los lagos canadienses muestran una temporada creciente libre de hielos de tres semanas, que está modificando la población relativa de las especies en el agua. Los corales del Caribe se están decolorando y muriendo porque, según creen algunos biólogos, la temperatura del mar está creciendo. Los satélites muestran unos casquetes de nieve decrecientes sobre el hemisferio norte[67].

Ninguna de estas observaciones prueba la existencia de un calentamiento de la tierra a causa de un incremento en la atmósfera de gases del efecto invernadero. Aun si se está produciendo un calentamiento, el significado de un cambio global del clima para la futura actividad humana o la salud del ecosistema no se sabe con certeza. Algunos políticos han llevado esa incertidumbre a alto grado de confusión. Por lo tanto es importante establecer qué es lo que se sabe con certeza[68]:

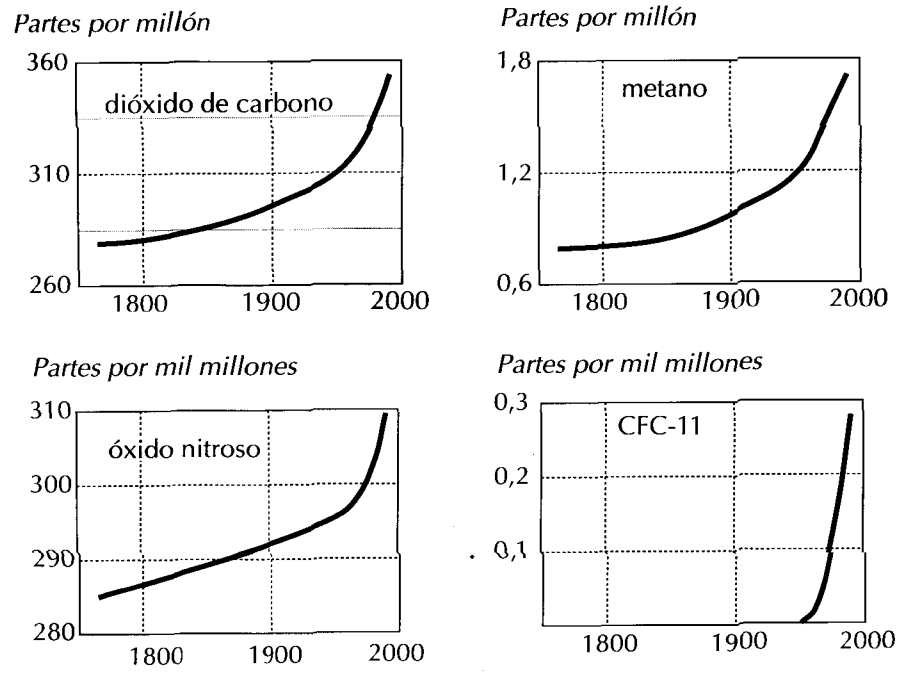
- Es cierto que las actividades humanas, específicamente la combustión de los combustibles fósiles y la deforestación, incrementan la concentración en la atmósfera de los gases que producen el efecto invernadero. Estos gases han sido controlados durante décadas. Su concentración histórica puede ser medida en las burbujas de aire capturadas en las capas de hielo que se perforan en los casquetes polares. No hay dudas sobre su incremento.

- Los gases de invernadero atrapan calor que de otra forma se disiparía de la tierra hacia el espacio. Ésa es una consecuencia bien conocida de su estructura molecular y frecuencias de absorción espectroscópica.

- El calor atrapado incrementará la temperatura de la tierra por encima de la que tendría de otra forma.

- El calentamiento será de distribución irregular, más cerca de los polos que cerca del ecuador. Dado que el tiempo y el clima de la

Figura 3-21 CONCENTRACIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO



El dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los clorofluorocarbonos (CFC) reducen la emisión de calor de la tierra hacia el espacio exterior. Por eso sirven todos al efecto de incrementar la temperatura de la tierra. La concentración atmosférica de estos gases, excepto los CFC que fueron sintetizados recientemente, se ha estado incrementando desde antes del 1800. (Fuente: *World Meteorological Organization*).

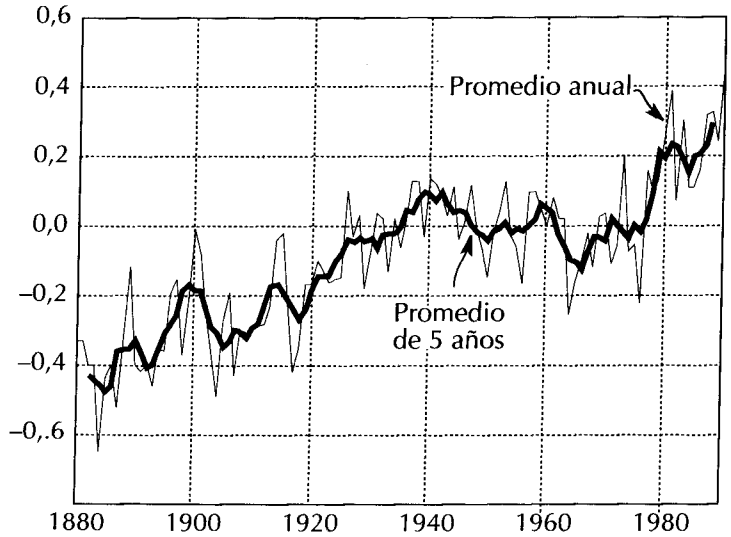
tierra son en gran medida movilizados por las diferencias de temperatura entre los polos y el ecuador, los vientos, las lluvias y las corrientes oceánicas cambiarán en fuerza y dirección.

- Sobre una tierra más caliente el océano se expandirá y los niveles del mar subirán. Si el calor es suficiente como para derretir el hielo polar en grandes cantidades, los niveles del mar crecerán en forma significativa.

Hay tres grandes incertidumbres. Una es cuál sería la temperatura global sin la interferencia humana. Si los factores climatológicos de lar-

Ilustración 3-22 INCREMENTO GLOBAL DE LA TEMPERATURA

Cambios de temperatura (°C) comparados con el promedio 1951-80



Las causas y las perspectivas a largo plazo de los incrementos globales de la temperatura siguen siendo objeto de debate científico y político. Sin embargo, hay pocas dudas de que el promedio global de las temperaturas se ha incrementado. En la década de 1980 se registraron los seis años más calurosos del último siglo. (Fuente: *T. A. Boden et al.*).

go plazo no relacionados con los gases del efecto invernadero están enfriando el planeta, entonces los gases señalados contrarrestarán esos factores, pero la tendencia contrarrestante puede no constituir un calentamiento neto. Una segunda incertidumbre es qué supondría, exactamente, un planeta en calentamiento para la temperatura, viento, corrientes, precipitaciones, ecosistema y la economía humana en cada sitio específico de la tierra.

La tercera incertidumbre tiene que ver con las retroalimentaciones. Los flujos de carbono y los flujos de energía sobre la tierra son inmensamente complejos. Puede haber mecanismos autocorrectivos, procesos de retroalimentación negativos, que estabilizarían los gases de invernadero o la temperatura. Uno de ellos ya está operando: los océanos están absorbiendo alrededor de la mitad del exceso de dióxido de carbono emitido por la humanidad. Ese efecto no es lo suficientemente fuerte como para frenar el incremento de la concentración del dióxido de carbono atmosférico, pero es suficiente como para retrasarla.

También puede haber bucles de retroalimentación positiva desestabilizantes, que, a medida que la temperatura se incrementa, harán a las cosas aún más calientes. Por ejemplo, como la temperatura reduce la capa de nieve, la tierra reflectará menos calor solar hacia el espacio, lo cual aumentará aún más la temperatura terrestre. Los suelos de la tundra en deshielo liberarán grandes cantidades de metano congelado, un gas de invernadero, que a su vez incrementará la temperatura, y provocará más deshielo y la liberación de todavía más metano.

Nadie sabe cómo las diversas respuestas de retroalimentación positiva y negativa interactúan o cuáles de ellas dominarán. Los científicos sólo saben que ha habido movimientos de temperatura al alza sobre la tierra en el pasado, y que no se ha visto un proceso de autocorrección rápida del fenómeno, u ordenada o tersa. En realidad ha sido caótica.

La ilustración 3-23 muestra 160.000 años de historia de la temperatura terrestre y de la concentración atmosférica de dos gases de efecto invernadero, dióxido de carbono y metano[69]. La temperatura y los gases de efecto invernadero han variado juntos, aunque no está claro quién causa a quién. Lo más probable es que la causalidad sea mutua en un complejo sistema de bucles de retroalimentación.

Pero el mensaje más importante de la ilustración 3-23 es que las actuales concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono y metano son mucho más altas de lo que eran hace 160.000 años. Cualesquiera que puedan ser las consecuencias de este fenómeno, no hay duda de que las emisiones humanas de gases de invernadero están llenando los sumideros atmosféricos con mucha mayor rapidez que la requerida para eliminarlos. Hay un desequilibrio significativo en la atmósfera global, y está empeorando en forma exponencial. Los procesos puestos en marcha por este desequilibrio se mueven con lentitud, si se miden a escala temporal humana. Puede llevar décadas que este proceso se convierta en un deshielo, en la elevación del nivel del mar, en un cambio de corrientes, modificación del ciclo de lluvias, tormentas más violentas, y la migración de los insectos, pájaros o mamíferos. Si los seres humanos deciden que estas consecuencias no son de su agrado, modificarlas puede llevar siglos.

Las emisiones contaminantes que hemos descrito en este capítulo no son necesarias. La contaminación no es un signo de progreso. Es un sig-

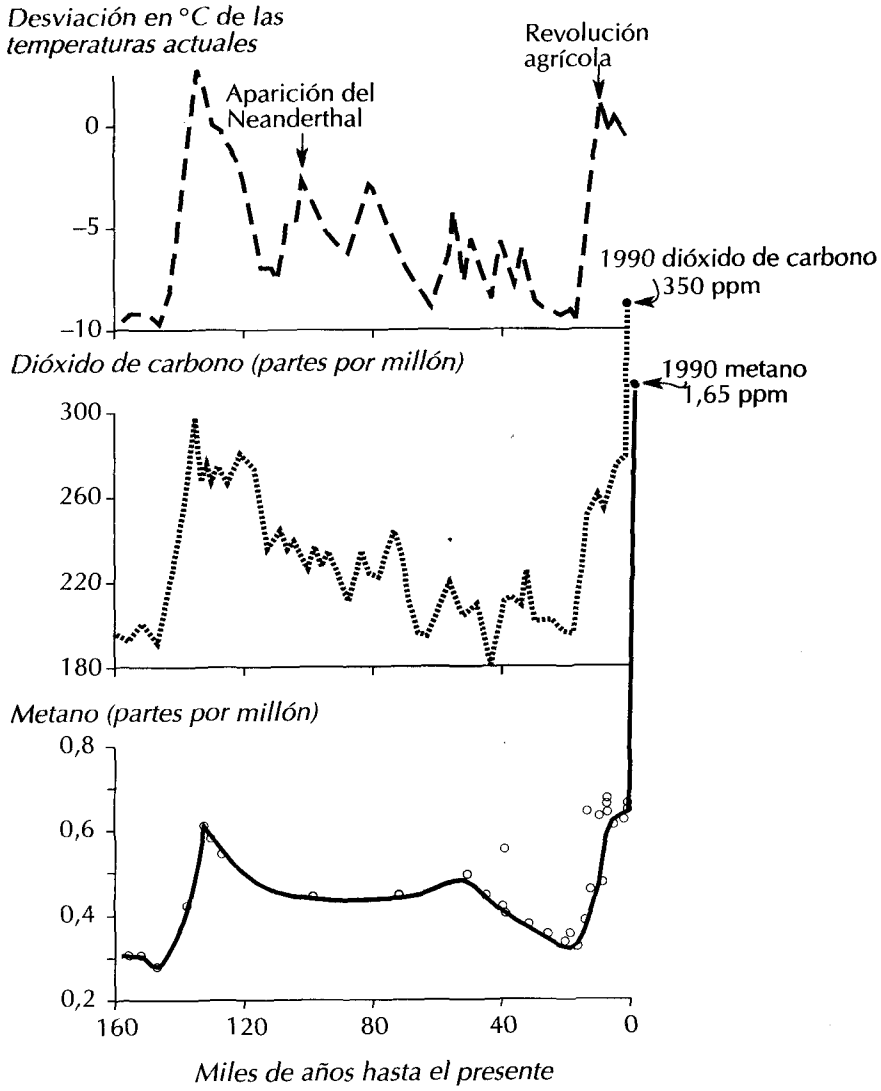
no de ineficacia y falta de cuidado. Las industrias descubren formas de reducir las emisiones contaminantes rediseñando los procesos de manufacturación desde el principio hasta el final, usando "tecnología limpia" y "sistemas de prevención cautelares". Un fabricante de circuitos impresos (*Aeroscientific*) invierte en columnas de intercambio iónico para recuperar residuos de metales pesados y acaba obteniendo ingresos de este proceso de recuperación, una factura de agua mucho menor, y menor coste de los seguros. Una empresa manufacturera (*3M*) reduce sus emisiones contaminantes al aire, las emisiones contaminantes al agua, sus necesidades de agua, y su producción de residuos sólidos, y ahorra 200 millones al año en gastos operativos. Una empresa fabricante de componentes de electrónica (*Intel*) cambia sus soldadoras y flujos para hacer innecesario el lavado con solventes CFC, con lo cual ha reducido su contribución a la extinción de la capa de ozono y al efecto invernadero ahorrando un millón de dólares al año.

El rediseño de los procesos productivos para impedir la contaminación puede ser eficiente en materia de costes, aun cuando el mercado no está dispuesto a descontar los costes medioambientales. Un informe de la OCDE sobre 600 proyectos franceses de tecnologías limpias ha puesto de relieve que el 67% ahorran en materias primas, un 65% conservan agua, y un 8% reducen el consumo de energía eléctrica. Sobre 45 proyectos de tecnología limpia de Holanda, 20 ahorran dinero; mientras que los otros no ven afectados sus costes en ningún sentido.

Sin embargo, la idea de la prevención de la contaminación no se ha difundido aún de forma plena en el mundo industrial. En Europa el 80% de la inversión industrial en la protección del medio ambiente consiste todavía en un sistema de depuración "al final de las tuberías"; sólo un 20% se destina al rediseño del proceso de producción[70].

El potencial del ingenio humano para reducir la contaminación está aún sin explotar. Si la vida media de cada producto que fluye a través de la economía humana se pudiera duplicar, se pudiera reciclar el doble de materiales que en la actualidad, y se redujera a la mitad la cantidad de material necesaria para generar cada producto, el saldo sería una reducción de los insumos globales por un factor de ocho. Si la utilización de la energía se hiciera más eficiente, si se utilizaran fuentes de energía renovable, si la tierra, los bosques, los alimentos y el agua se usaran con un mayor margen de aprovechamiento y se restablecieran los bosques, se podría detener el crecimiento de los gases de invernadero y de muchos

Ilustración 3-23 GASES DE INVERNADERO Y TEMPERATURA GLOBAL DURANTE LOS ÚLTIMOS 160.000 AÑOS



La medición de los núcleos de hielo muestra que se han registrado variaciones significativas de temperatura sobre la tierra (eras glaciales y periodos interglaciales) y que los niveles de dióxido de carbono y de metano en la atmósfera han aumentado en concierto con las temperaturas globales. Las recientes concentraciones de estos gases de invernadero se han elevado en forma espectacular en comparación con las eras previas a la aparición de la especie humana. (Fuente: *R. A. Houghton et al.*).

otros agentes contaminantes. Llevar el consumo de energía y materiales por debajo de los límites de sus fuentes reduce automáticamente los flujos contaminantes.

La concentración de algunos agentes contaminantes en la atmósfera, agua y suelos, está cayendo porque las sociedades humanas han tomado fuertes medidas para forzar esa reducción. Algunos agentes contaminantes se mantienen a niveles estables a grandes rasgos, y a costa de grandes esfuerzos. Algunas de las medidas adoptadas lo único que han logrado es trasladar contaminantes de un sumidero al otro, del aire a la tierra, o del agua al aire. La presencia de muchos agentes contaminantes sigue creciendo en forma exponencial, debido a que la población humana, sus inversiones de capital fijo y los materiales y energía que fluyen a través de él siguen creciendo. Los ataques concertados sobre los contaminantes más peligrosos pueden ayudar a que el mundo consiga apartarse de alguno de sus límites medioambientales, con la condición de que la humanidad sea capaz de aprender acerca de ellos y actuar a tiempo. Mayores eficiencias en el uso de materiales y de energías son bastante más efectivas que la actuación sobre los resultados de los procesos de producción. Podrían reducir muchos de los flujos de contaminantes por un factor de 2 o 5 o 10, y ayudar a alejar al mundo de los límites medioambientales que ya ha traspasado.

Más allá de los límites de los insumos globales

La evidencia mostrada en este capítulo, la evidencia contenida en las bases de datos del mundo, y la evidencia de los sentidos de cualquier persona que mire al mundo desde cualquier puesto de observación con cierta perspectiva, muestran que la sociedad humana no está utilizando los recursos y sumideros de la tierra en forma sostenible.

Suelos, bosques, aguas de superficie, aguas subterráneas, marismas y pantanos, y la naturaleza en su diversidad son degradados. Incluso en las regiones en las que los recursos renovables parecen estables, como los bosques de Norteamérica o los suelos de Europa, la calidad, diversidad o salud de los recursos se están cuestionando. Los depósitos de minerales y de combustibles fósiles se extraen con tendencia a la extinción. No existen planes ni programas de inversión de capital para impulsar la economía industrial tras la desaparición de los combustibles fósiles. Los agentes contaminantes se están acumulando; sus sumideros

se están desbordando. La composición química de toda la atmósfera global está cambiando.

Si se tratara de la caída de los *stocks* de sólo un par de recursos mientras el resto se mantuviera estable o se incrementara, se podría argumentar que el crecimiento se podría sostener mediante la sustitución de recursos (aunque haya límites a una tal sustitución). Pero, cuando muchas fuentes están en erosión y muchos sumideros se están llenando, no pueden caber dudas de que la retirada de recursos y energía por parte de la humanidad ha crecido en exceso. Ha sobrepasado sus límites sostenibles.

Los límites, seamos claros, son para los insumos globales. Son límites de velocidad, no límites espaciales, límites a la tasa de flujo, no límites a la cantidad de personas sobre la cantidad de capital (al menos no en forma directa). Estar más allá de ellos no quiere decir toparse con un muro absoluto. Puede incluso querer decir que los insumos materiales y energéticos aún pueden crecer durante un tiempo, antes de que la retroalimentación negativa de fuentes sobrexigidas o sumideros les fuercen a la baja. Pero hacia abajo es la dirección que deberán adoptar los flujos de insumos globales, ya sea por elección humana o merced a retroalimentaciones naturales poderosas y desagradables.

Muchas personas reconocen, al menos a un nivel local, que los insumos destinados a la economía humana han crecido más allá de sus límites. La ciudad de Los Ángeles emite más contaminación al aire de la que pueden soportar los pulmones humanos. Los bosques de las Filipinas casi se han extinguido. Los suelos de Haití han sido erosionados en algunas zonas hasta la roca. La descarga química en el Rin es tan alta que los sedimentos en los puertos holandeses deben ser tratados como residuos peligrosos. En el caso de algunos problemas particulares, como el de los CFC que erosionan la capa de ozono, no sólo ha habido un reconocimiento de *sobrepasamiento*, sino ciertos esfuerzos internacionales para adoptar acciones correctivas.

Pero hay escasa discusión sobre el problema general del *sobrepasamiento,* escasa presión en cuanto a los cambios técnicos que son necesarios con urgencia, y escasa voluntad de hacer frente a las fuerzas subyacentes al crecimiento de la población y el capital. Incluso grupos involucrados e informados, como la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, que ha estudiado a fondo las tendencias mundiales y las ha caracterizado de "simplemente insostenibles", no han

sido capaces de decir, de forma clara, "el mundo humano ha ido más allá de sus límites", o de hacer frente con seriedad a la cuestión de reducir los insumos globales.

Los motivos que conducen a evitar en forma generalizada la cuestión de los límites son políticos. Cualquier conversación sobre los límites se transforma en un amargo debate, ya en curso, sobre quiénes son los verdaderos contaminantes del mundo. El flujo de insumos globales por cada persona rica es mucho mayor que el flujo de insumos globales por persona pobre. Los insumos globales por tonelada de acero son mayores para una planta ineficiente del Este europeo que para un supereficiente minicomplejo siderúrgico japonés. Se afirma que un suizo utiliza tanta energía como 40 somalíes, y un ruso usa tanta energía como un suizo sin obtener de ello ni siquiera un nivel de vida decente. Si el mundo en su conjunto está excediendo sus límites, quién debería hacer algo acerca de ello: ¿los ricos dilapidadores o los pobres que se multiplican, o los torpes ex-socialistas?

En cuanto concierne al planeta, la respuesta es que todos los señalados. Los defensores del medio ambiente resumen las causas del deterioro del medio ambiente con una fórmula que denominan IPAT:

$$\text{Impacto} = \text{Población} \times \text{Afluencia} \times \text{Tecnología}$$

El impacto (insumos globales) de cualquier población o nación sobre las fuentes o sumideros del planeta es el producto de su población (P) multiplicada por su nivel de afluencia (A) multiplicado por el daño que ocasionan tecnologías particulares (T) que soportan esa afluencia[71]. Ya que cada término de esta ecuación multiplica el impacto en la misma forma, se deduciría que cada sociedad debería hacer mejoras donde mayores oportunidades tiene de hacerlas. El Sur donde tiene más margen para hacerlas es en P, el Oeste en A, el Este en T.

La amplitud total para mejorar es sorprendente. Si definimos cada término en la ecuación IPAT con mayor precisión, podemos ver cuántos caminos hay para reducir los insumos globales, y qué grandes reducciones se pueden efectuar (ver ilustración 3-24)[72].

La afluencia puede ser definida como el *stock* de capital por persona: el número de tazas (o televisiones, o coches o habitaciones en una casa) por persona. El impacto o insumos globales debidos a la afluencia consiste en los flujos materiales necesarios para mantener cada forma de capital. Por

Cuadro 3-4 EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA POBLACIÓN, AFLUENCIA Y TECNOLOGÍA

Población	Afluencia			Tecnología			
Población	X Stock de capital / Persona	X Materiales insumos / Stock de capital	X	Energía / Materiales insumos	X	Impacto ambiental / Energía	
Ejemplo							
Población	X Vasos / Personas	X Agua + Jabón / Vasos/año	X	Gigajulios o Kilovatios/hora / Kilogramos Agua + Jabón	X	CO_2 NOx Uso de la tierra / Gigajulios o Kilovatios/hora	
Herramientas aplicables							
Planificación familiar	Valores	Longevidad del producto		Eficiencia de uso		Fuentes benignas	
Alfabetización femenina	Precios	Elección del material		Eficiencia de conversión		Escala	
Bienestar social	Costes totales	Materiales mínimos diseño		Eficiencia de distribución		Ubicación	
Papel de la mujer	¿Qué deseamos?	Reciclado		Integración de sistemas		Mitigación técnica	
Tenencia de la tierra	¿Qué es suficiente?	Recuperación de residuos		Rediseño de procesos		Efectos que contrarrestan	
Proyección aproximada del cambio a largo plazo							
~2 X	?	~3 - 10 X		~5 - 10 X		~10^2 - 10^3 X	
Escala temporal de grandes cambios							
~50 -100 años	~0 - 50 años	~0 - 20 años		~0 - 30 años		~0 - 50 años	

ejemplo, si hay tres tazas de porcelana por persona, mantener esas tazas requiere detergente y agua para lavarlas y un pequeño flujo de tazas para reemplazar las roturas anuales. Si una persona usa en su trabajo tazas descartables de poliestireno para el café, el flujo de mantenimiento incluye todas las tazas utilizadas al año y el petróleo y productos químicos necesarios para producir el poliestireno.

El impacto de la tecnología se define en la ilustración 3-24 como la energía necesaria para hacer y llevar cada flujo material, multiplicado por el impacto en el medio ambiente por unidad de energía. Hace falta energía para extraer la arcilla destinada a las tazas, para hornearla, y para entregarla en destino, y para calentar el agua con la que se las lava. Se requiere energía para encontrar y bombear el petróleo para las tazas de poliestireno, para transportar el petróleo, para hacer funcionar la refinería, formar el polímero, moldear las tazas, entregar las tazas, y transportar las tazas utilizadas al basurero. Cada tipo de energía tiene sus efectos en el medio ambiente. El impacto puede modificarse tecnológicamente con sistemas de control de contaminación, con cambios en la eficiencia energética, o cambiando a otra fuente de energía.

Las modificaciones en cualquier factor de la ilustración 3-24 acercarán o alejarán a la economía humana de los límites del planeta. Lo mismo ocurrirá con menores flujos de energía o materiales destinados al reemplazo o al mantenimiento. Lo mismo ocurrirá con un menor impacto de la contaminación por unidad de material o de energía. La ilustración 3-24 da un listado de algunas de las herramientas que pueden ayudar a reducir cada factor en la ecuación y además algunas estimaciones de en cuánto podría reducirse cada factor, y en qué escala temporal.

Se puede observar, cuando las opciones son dispuestas de esta forma, que hay muchas, muchas elecciones. El impacto humano sobre las fuentes del planeta y sus sumideros puede ser reducido hasta un nivel sorprendente. Aun si nos atenemos sólo al nivel inferior para cada estimación de cambio posible, tomadas en su conjunto podrían reducir el impacto humano sobre el planeta por un factor de millar o más —posiblemente mucho más.

Tal como ha dicho el economista del MIT Lester Thurow, "Si la población del mundo tuviera la productividad de los suizos, los hábitos de consumo de los chinos, el instinto igualitario de los suecos y la disciplina social de los japoneses, entonces el planeta podría soportar muchas veces su actual población sin privaciones para nadie. Por otra parte, si la población mundial tuviera la productividad de Chad, los hábitos de consumo de Estados Unidos, los instintos antiigualitarios de la India y la disciplina social de Argentina, entonces el planeta no podría soportar nada que se acercara a sus cifras actuales"[73].

Si hay tantas opciones, ¿por qué el mundo no se toma la molestia de ajustarse a alguna de ellas? ¿Qué ocurriría si lo hiciera? ¿Qué ocurriría si las tendencias de la población, afluencia y tecnología comenzaran a modificarse? ¿Qué pasa con las formas en que se interconectan entre ellas? ¿Qué ocurre si los insumos totales se reducen por los cambios técnicos, y entonces el capital y la población crecen aún más? ¿Qué pasa si los insumos globales no se reducen para nada?

Éstas son preguntas no sobre los recursos vistos aisladamente, como los hemos analizado en este capítulo, sino sobre los recursos vistos en su conjunto, interactuando con la población y el capital, que a su turno interactúan entre sí. Para describirlos debemos movernos desde el análisis estático de factor por factor al análisis de un sistema global dinámico.

Capítulo 4:

LA DINÁMICA DEL CRECIMIENTO EN UN MUNDO FINITO

El hombre es como cualquier otra especie en su habilidad para reproducirse más allá de la capacidad de soporte de cualquier hábitat finito. El hombre, a diferencia de cualquier otra especie, es capaz de pensar sobre este hecho y descubrir sus consecuencias.

WILLIAM R. CATTON, JR[74]

En la mayor parte del mundo el capital crece más de prisa que la población; en unas pocas partes del mundo sucede lo contrario. En algunas partes la creciente seguridad económica y el poderío están haciendo descender las tasas de natalidad, en otras la pobreza y la desintegración social están elevando las tasas de mortandad. La gente que se está haciendo más rica demanda más productos industriales, más energía y aire más limpio. La gente pobre lucha por agua pura, tierra para cultivar, leña para quemar. Algunas tecnologías incrementan los flujos contaminantes, otras los reducen. Los *stocks* de recursos no renovables, y algunos renovables, están siendo agotados; otros son usados en forma más extensiva y eficiente.

Poderosas tendencias siguen cursos antagónicos. Para ponerlas una al lado de la otra y poder vislumbrar sus implicaciones combinadas, necesitamos un modelo más complejo que el que podemos estructurar en nuestras cabezas. Este capítulo trata sobre el modelo informático que hemos utilizado, su estructura y sus hallazgos básicos.

Objetivos y estructura del World3

Unas palabras previas sobre modelos. Un modelo es cualquier representación simplificada de la realidad. Cada palabra de este libro es un

modelo. "Crecimiento", "población", "bosque", "agua", son simplemente símbolos, que representan realidades sumamente complejas. Cada gráfico, cuadro, mapa y dato acerca del mundo es un modelo. Decir que la población mundial ha alcanzado los 5.400 millones de almas no es preciso, ni es una forma de capturar la realidad, diversidad o humanidad de esa gente. La forma en que hemos agrupado los números y las palabras para hacer este libro es un modelo de lo que está en nuestras cabezas. Es el mejor intento posible para simbolizar nuestros pensamientos, pero es sólo un modelo de esos pensamientos. Y, desde luego, nuestros pensamientos, y los pensamientos de cualquier persona, son solamente modelos del mundo real.

Esto determina una dificultad. Estamos a punto de hablar acerca de un modelo formal, una simulación del mundo basada en un ordenador. Para que este modelo sirva a algún fin, deberemos compararlo con el "mundo real", pero ni nosotros, ni nuestros lectores, tienen un modelo previamente acordado sobre el mundo real como para compararlo. Disponemos solamente de los modelos de nuestros mundos mentales. Los mundos mentales son informados por las evidencias objetivas y la experiencia subjetiva. Han permitido al *Homo sapiens* devenir una especie biológica tremendamente exitosa. También han metido a la gente en todo tipo de complicaciones. Pero cualesquiera que sean sus fuerzas y debilidades, los modelos mentales humanos deben ser terriblemente simples comparados con el inmenso, complejo y siempre cambiante universo dentro del cual existen.

Para recordarnos nuestra inevitable dependencia de los modelos, en adelante pondremos entre comillas el referente del modelo World3, el "mundo real". Lo que queremos decir con "mundo real" o "realidad" es los modelos mentales de los autores de este libro. No hacemos apología alguna de ese referente; es el único del que disponemos. Los modelos mentales son los únicos referentes que cualquier autor o lector tiene. No podemos escapar a ese hecho, y es importante reconocerlo.

World3 no es un modelo difícil de entender. Mantiene la pista de *stocks* como "población", "capital industrial", "contaminación" y "tierras cultivadas". Esos *stocks* se modifican debido a flujos tales como "nacimientos" y "muertes" (en el caso de la población), "inversión" y "depreciación" (en el caso del capital), y "generación de la contaminación" y "asimilación de la contaminación" (en el caso de la contaminación). La superficie cultivada multiplicada por el rendimiento medio de la tierra da

la producción total de alimentos. La producción de alimentos dividida por la población da la cantidad de alimentos *per cápita*. La cantidad de alimentos *per cápita* influye sobre la tasa de mortandad.

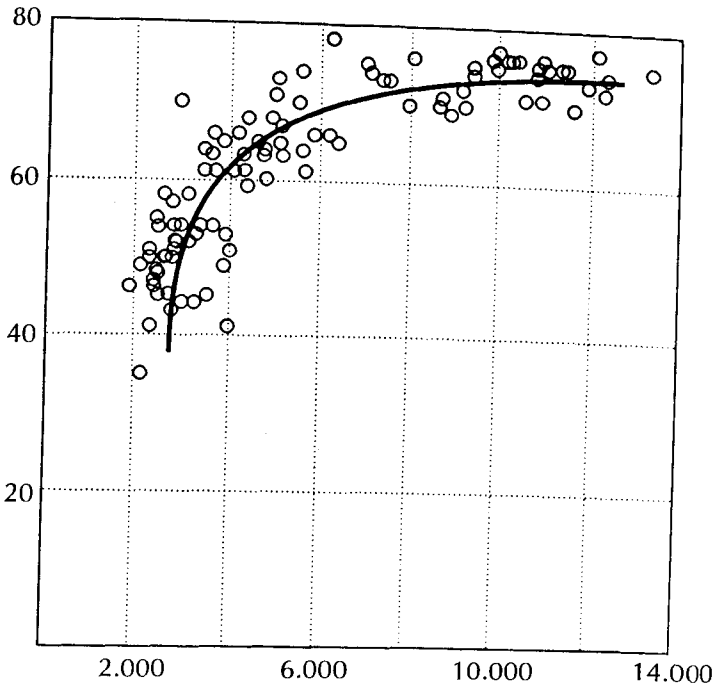
Nada extraordinario. Los componentes del World3 son elementos comunes. Pero han sido agrupados de tal forma que es dinámicamente complejo. World3 toma en cuenta el momento del crecimiento poblacional, la acumulación de la contaminación, la prolongada vida del capital productivo, los flujos cambiantes de los recursos, los tirones competitivos de la inversión. Se centra especialmente en el tiempo que demandan los acontecimientos y en los retrasos de los flujos de información y procesos físicos. Se basa en procesos de retroalimentación, lo cual quiere decir que un elemento puede ser la causa parcial de su propio comportamiento futuro. Un cambio en la población, por ejemplo, puede ocasionar un cambio en la economía, que a su vez puede producir otra modificación en la población.

Muchas relaciones causales en el World3 son *no lineales*: no se trata de líneas rectas, no son estrictamente proporcionales a todos los rangos de las variables relacionadas. Por ejemplo, en World3 un incremento de los alimentos *per cápita* causa un aumento de la expectativa de vida humana, pero no se trata de un incremento lineal. En la ilustración 4-1 se ve el trazo de los alimentos *per cápita* comparado con las expectativas de vida. Si la gente que no está adecuadamente alimentada obtiene más alimentos, su expectativa de vida puede aumentar en forma notoria. Pero más alimentos para una población que ya está bien alimentada tiene escaso efecto sobre sus expectativas de vida (y en cierto sentido puede incluso reducirla).

Las relaciones no lineales son visibles en todo el "mundo real" y a través de todo el World3. A causa de ellas tanto el "mundo real" como el World3 pueden a veces dar lugar a comportamientos sorprendentes, tal como se demostrará más adelante en este capítulo.

Los comportamientos no lineales del World3 y las estructuras de retroalimentación lo hacen dinámicamente complejo, pero el modelo no es complicado. No distingue entre las distintas partes geográficas de la tierra, ni representa por separado a ricos y pobres. Mantiene el rastro de un solo agente contaminante genérico, que se mueve a través del medio ambiente y lo afecta de formas que son comunes a cientos de contaminantes que la ciencia ha identificado. Distingue los recursos renovables que producen alimentos de los no renovables que producen los combustibles fósiles y los minerales, pero no mantiene una contabilidad separada de cada tipo de alimento, cada combustible y cada mineral.

Ilustración 4-1 NUTRICIÓN Y EXPECTATIVAS DE VIDA

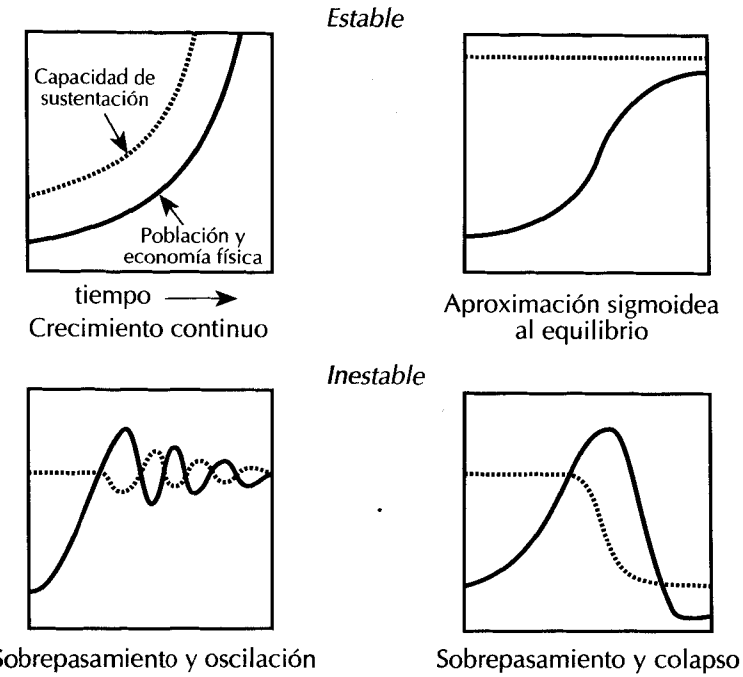


La expectativa de vida de una población es una función no lineal de la nutrición que recibe la población. Cada punto de este gráfico representa la expectativa de vida promedio y nivel de nutrición de una nación en 1988. El nivel de nutrición está expresado en equivalentes calóricos vegetales por persona y por día: las calorías obtenidas de fuentes animales se multiplican por un factor de conversión de 7 (ya que aproximadamente siete calorías de alimento vegetal son necesarias para producir una caloría de origen animal). (Fuentes: *FAO*; *Population Reference Bureau*).

Ese grado de simplicidad sorprende a alguna gente que da por sentado que un modelo mundial debe contener todo lo que se sabe acerca del mundo, especialmente todas las distinciones, que son tan fascinantes y, desde el punto de vista de cada individuo, tan críticas.

En relidad, incluso los grandes modelos de ordenador sumamente detallados deben ser groseras simplificaciones del conocimiento humano. Los profesionales dedicados a los modelos informáticos, si no quieren pro-

Ilustración 4-2 POSIBLES MODALIDADES DE APROXIMACIÓN DE UNA POBLACIÓN A SU CAPACIDAD DE SUSTENTACIÓN



La cuestión central abordada por el modelo World3 es: ¿Cuál de estos modos de comportamiento puede ser el resultado a medida que la población humana y la economía se aproximan a su capacidad de sustentación?

ducir estructuras impenetrables, se deben disciplinar. No pueden alimentar a sus modelos con todo lo que saben; sólo deben introducir lo que es relevante para su objetivo. El arte de los modelos de este tipo, como el arte de la poesía, de la arquitectura o del diseño de ingeniería, es incluir sólo lo que es necesario para lograr el objetivo, y nada más. Eso es fácil de decir pero difícil de hacer.

Por lo tanto, para comprender un modelo y juzgar su "validez", uno necesita comprender su objetivo. El objetivo —el único objetivo— del World3 es comprender los posibles modos de aproximación de la economía humana a la capacidad de sustentación[75] del planeta. Sólo para ese objetivo consideramos "válido" el modelo. Hay muchas

otras preguntas importantes que hacer: cuáles son las posibilidades de desarrollo de África, cómo diseñar un programa de planificación familiar, cómo cerrar la brecha entre ricos y pobres. Los modelos de ordenador, distintos del World3, pueden ayudar a contestar algunas de estas preguntas. Se debe responder a todas ellas, entendemos, dentro del contexto de una sociedad global que se encuentra con y se adapta a los límites de la tierra.

Una población creciente puede acercarse a su capacidad de transporte de cuatro formas genéricas (ver ilustración 4-2). Puede crecer sin interrupción, mientras sus límites estén lo suficientemente lejos o creciendo a mayor velocidad. Puede nivelarse suavemente en equilibrio con la capacidad de transporte, en un comportamiento que los ecologistas denominan crecimiento logístico en forma de S, o *sigmoideo*. Puede sobrepasar sus límites y oscilar alrededor de ellos durante algún tiempo antes de nivelarse. O puede sobrepasar sus límites, destruir su base de recursos y estrellarse.

Hemos creado el modelo World3 para responder a estas dos preguntas: *¿Cuál de los modelos de comportamiento reflejados en la ilustración 4-2 es el que más probablemente sigan la población y economía humanas? ¿Qué condiciones o políticas incrementarán las posibilidades de una aproximación suave a los límites planetarios?*

Ésas son preguntas sobre amplias posibilidades conductuales, y no condiciones precisas del futuro. Darles respuesta exige una modelización distinta y un tipo de información diferente que la requerida por la predicción precisa. Por ejemplo, si se arroja una pelota al aire, uno sabe lo suficiente como para prever cuál será su comportamiento general. Se elevará con velocidad decreciente, luego cambiará de dirección y caerá con velocidad creciente hasta que se estrelle contra el suelo. Sabe que no continuará ascendiendo indefinidamente, ni comenzará a describir una órbita alrededor de la tierra, ni hará tres volteretas antes de caer a tierra.

Si deseara predecir la altura exacta que puede alcanzar la pelota, o concretamente dónde y cuándo golpeará el suelo, necesitaría información precisa sobre la pelota, la altura, el viento, la fuerza del lanzamiento inicial. De forma similar, si deseáramos predecir el tamaño exacto de la población mundial en el 2026, o cuándo alcanzará su máximo la producción de petróleo, o qué límite afectará a una nación específica en primer lugar, necesitaríamos un modelo sumamente complicado —en realidad, uno imposible.

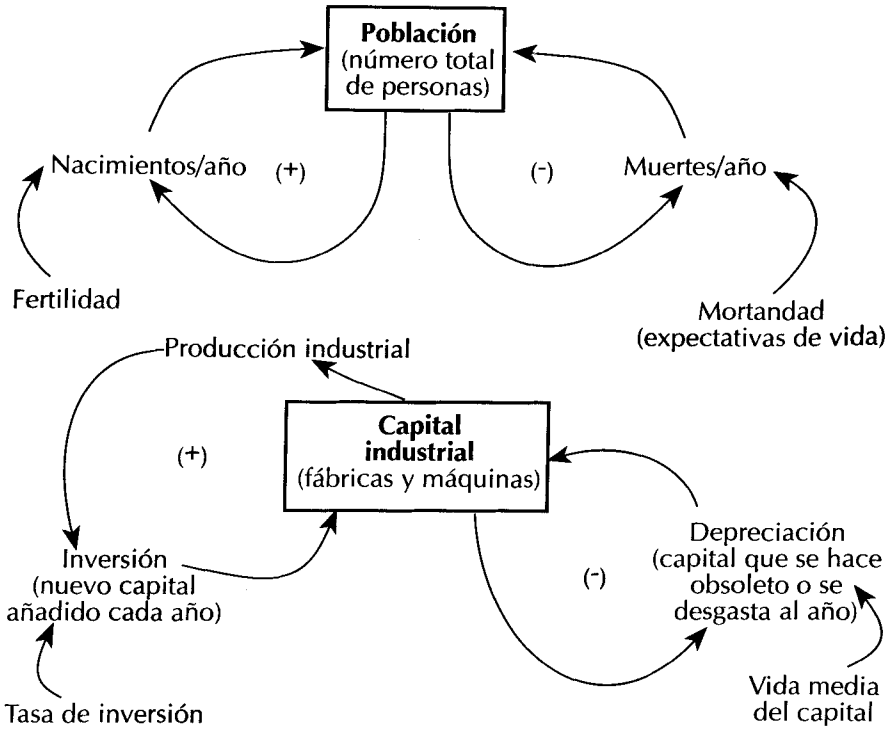
Es imposible hacer "predicciones puntuales" precisas sobre el futuro de la población mundial, el capital y el medio ambiente. Nadie sabe lo suficiente como para hacerlo. Y el futuro de ese sistema es demasiado dependiente de la elección humana para que se pueda predecir con precisión. Es posible, sin embargo, y críticamente importante, comprender las amplias posibilidades de comportamiento del sistema, en particular porque el colapso es una de ellas. Por lo tanto, hemos introducido en World3 el tipo de información que se utiliza para comprender los modos genéricos de comportamiento de las pelotas que se tiran, y no el tipo de información necesaria para describir la trayectoria exacta del tiro específico de una pelota dada.

Así, por ejemplo, pensamos que era importante representar a la contaminación como algo que es generado por la agricultura y la industria y algo que puede afectar a la salud de los seres humanos y de las cosechas. Hemos incluido un tiempo de demora antes de que la contaminación pueda encontrar su camino hasta un sitio en el que pueda hacer un daño mensurable, porque sabemos que se necesita cierto tiempo para que un pesticida se abra camino hasta las aguas subterráneas, o para que una molécula de clorofluorocarbono se eleve y dañe la capa de ozono, o para que los residuos de mercurio lleguen hasta un río y se acumulen en el organismo de los peces. Deseábamos representar el hecho de que los procesos naturales pueden convertir en inocuos a la mayor parte de los agentes contaminantes después de cierto tiempo, y también el hecho de que esos procesos naturales de depuración de contaminantes pueden a su vez verse impedidos. Todas esas características generales de la contaminación están en el World3, pero el modelo no distingue los PCB de los CFC y del DDT.

Hemos incluido en el World3 las mejores cifras que hemos podido encontrar, pero reconocemos una amplia esfera de incertidumbre en torno a algunos números. A causa de todas las incertidumbres y simplificaciones que sabemos que existen en el modelo (y otras que están en el modelo y desconocemos) no ponemos fe en el paso numérico exacto que el modelo arroja para población, contaminación, capital o producción de alimentos. Confiamos en el comportamiento básico, en el hecho de que la población o la contaminación crecen, o se mantienen estables, u oscilan, o declinan. Pensamos que las interconexiones primarias en el World3 son "válidas", y esas interconexiones determinan el comportamiento general del modelo.

¿Cuáles son esas interconexiones primarias? Comienzan con los bucles de retroalimentación alrededor de población y capital, que hemos descrito en el capítulo 2, y que se reproducen en la ilustración 4-3. Dan a la

Ilustración 4-3 BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN QUE GOBIERNAN EL CRECIMIENTO DE POBLACIÓN Y CAPITAL



Los bucles de retroalimentación centrales del modelo World3 gobiernan el crecimiento de la población y del capital industrial. Los dos bucles de retroalimentación positivos que involucran nacimientos e inversión generan la conducta del crecimiento exponencial de la población y el capital. Los dos bucles de retroalimentación negativos que involucran muertes y depreciación tienden a regular este crecimiento exponencial. Las fuerzas relativas de los distintos ciclos dependen de muchos otros factores en el sistema.

población y al capital el potencial de crecer en forma exponencial si dominan los ciclos positivos de natalidad e inversión, el potencial de declinar si dominan los ciclos de muerte y depreciación, y el potencial de permanecer en equilibrio si los ciclos están en equilibrio.

En todos nuestros diagramas de bucles de retroalimentación, como el de la ilustración 4-3, las flechas indican simplemente que una variable

influye en otra a través de flujos físicos o de información. El grado y la naturaleza de la influencia no se muestran en los diagramas, aunque, desde luego, han sido especificados matemáticamente para el ordenador.

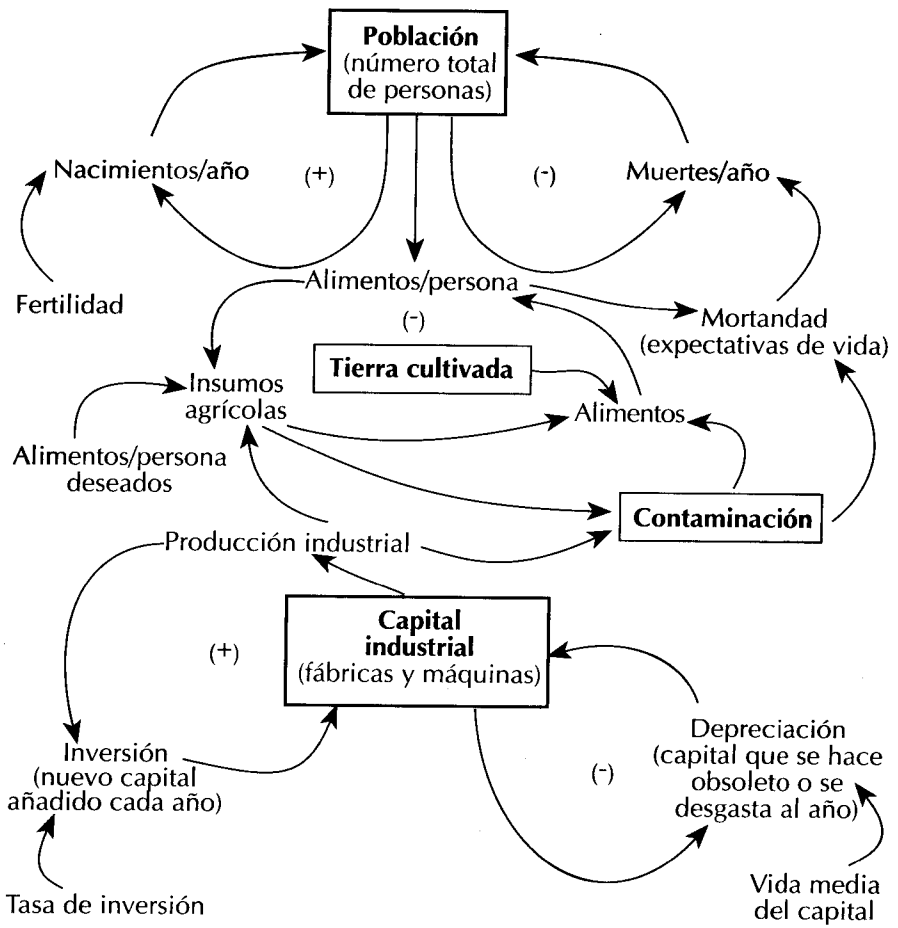
Los recuadros del diagrama indican los *stocks*. Se trata de acumulaciones de cantidades físicas, tales como población, fábricas o contaminación. Los *stocks* en un sistema tienden a cambiar sólo lentamente porque los objetos que contienen tienen una vida prolongada. Los *stocks* representan la situación actual del sistema tal como se ha acumulado a lo largo de su historia. Las fábricas en sus emplazamientos, el número de personas, la concentración de agentes contaminantes, los recursos sobrantes, la tierra en explotación, son todos ellos *stocks* importantes en el sistema de World3. Ellos determinan las limitaciones y posibilidades del sistema en cada momento del tiempo simulado.

Los bucles de retroalimentación en los diagramas causales están marcados por (+) si se trata de ciclos positivos, ciclos que se refuerzan a sí mismos y que pueden generar crecimientos exponenciales. Si son negativos están marcados con un (-), ciclos que buscan un objetivo e invierten la dirección del cambio o intentan llevar al sistema a un punto balanceado o de equilibrio.

Algunas de las formas en las que la población y el capital se influyen mutuamente en el World3 se muestran en la ilustración 4-4. El capital industrial genera gran cantidad de productos, uno de los cuales está formado por los insumos agrícolas: tractores, sistemas de irrigación, fertilizantes y pesticidas. Los insumos agrícolas y la tierra en cultivo determinan la producción de alimentos. El alimento también resulta afectado por la contaminación, que proviene tanto de la actividad industrial como de la agrícola. El alimento por persona influye en la tasa de mortandad de la población.

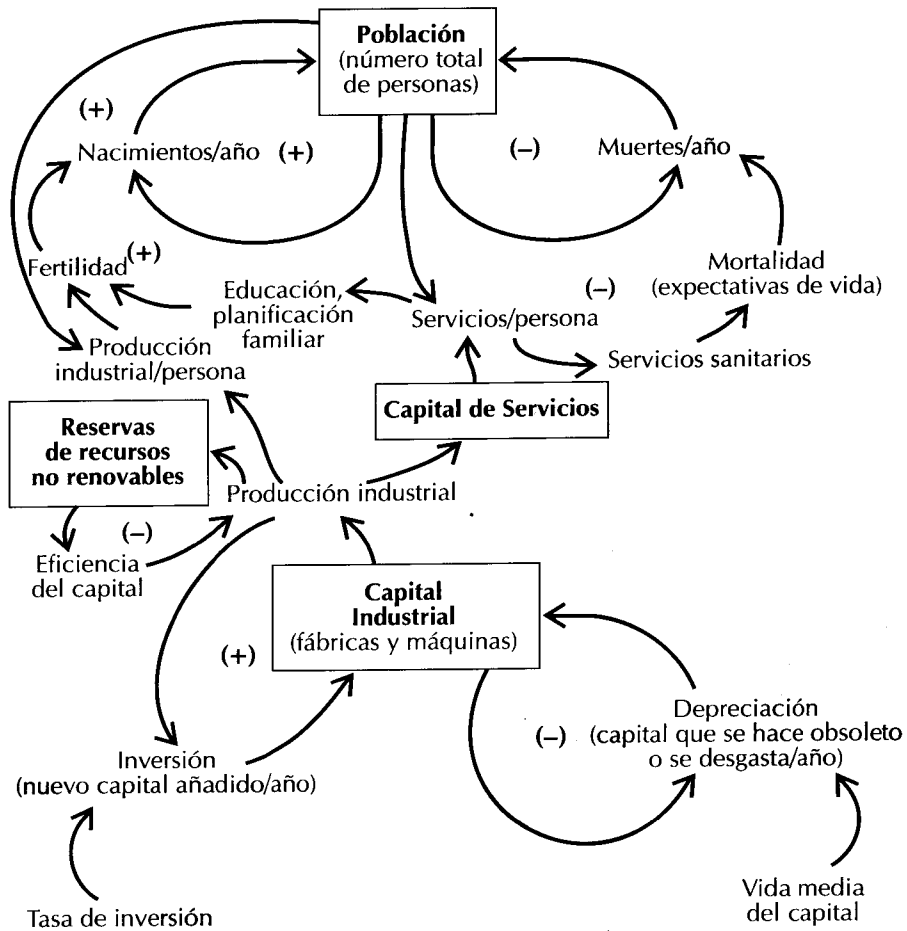
La ilustración 4-5 muestra algunos de los vínculos que en World3 relacionan población, capital, servicios y fuentes no renovables. Algunos productos industriales adoptan la forma de capital de servicios: viviendas, escuelas, hospitales, bancos, y el equipo que contienen. El producto del capital de servicios dividido por la población arroja el nivel medio de servicios por persona. Los servicios sanitarios hacen decrecer la tasa de mortandad de la población. Los servicios de planificación y educación familiar hacen descender la tasa de natalidad. Se considera además que el producto industrial creciente por persona reduce la tasa de natalidad en forma directa (tras cierto retraso) al modificar las modalidades de empleo, los costes de sacar adelante una familia, y la forma en que las familias distribuyen su tiempo.

Ilustración 4-4 BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN DE POBLACIÓN, CAPITAL, AGRICULTURA Y CONTAMINACIÓN



Algunas de las interconexiones entre población y capital industrial operan a través del capital agrícola, tierras cultivadas y contaminación. Cada flecha indica una relación causal, que puede ser inmediata o retardada, grande o pequeña, positiva o negativa, dependiendo de lo que se asuma en cada procesamiento del modelo.

Ilustración 4-5 BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN DE POBLACIÓN, CAPITAL, SERVICIOS Y RECURSOS



La población y el capital industrial están también influidos por los niveles de capital de servicios (tales como servicios sanitarios y educativos) y de las reservas de fuentes no renovables.

Cada unidad de producción industrial en el esquema se considera que consume recursos no renovables. Exactamente cuántos recursos son necesarios por unidad de producción industrial es algo que puede ser modificado por la tecnología, pero el modelo no admite que la industria haga algo de la nada. A medida que disminuyen los recursos no renovables, se

considera que el grado de reservas remanentes declina y que los yacimientos se encuentran a mayor profundidad y a mayores distancias de sus centros de consumo. Eso equivale a afirmar que su proceso de agotamiento progresa, que es necesario más capital para extraer una tonelada de cobre o un barril de petróleo de la tierra.

La relación entre los recursos restantes y el capital necesario para explotarlos es altamente no lineal. Algunas de las claves de cómo se representa el proceso se muestran en la ilustración 4-6, que representa la energía necesaria para extraer hierro y aluminio de mineral con diversos tenores de concentración. La energía no es un capital (el capital en sí mismo es difícil de medir), pero la energía implica capital, ya que, al disminuir el tenor, se debe extraer más roca por tonelada final del recurso, la roca debe ser triturada en partículas más finas, debe ser separada con mayor precisión entre sus componentes minerales, y se acumulan mayores montañas de residuos tras el proceso, todo lo cual se hace mediante máquinas. Si se hace necesario más capital en el sector de producción de recursos, hay menos inversión disponible para otros fines dentro de la economía.

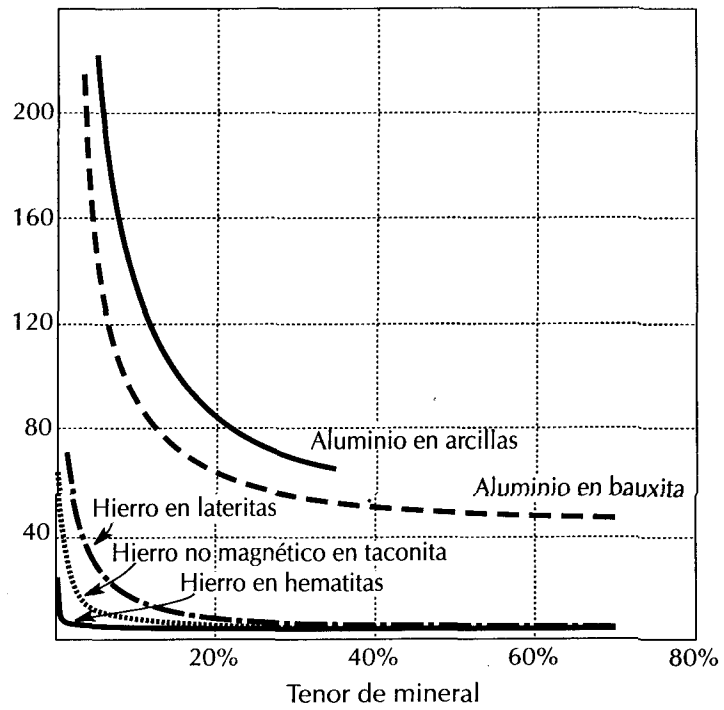
Diagramas de todas las interconexiones en el World3 se muestran en el Apéndice. No es necesario comprender cada una de estas interconexiones para aprehender el funcionamiento del modelo. Los rasgos más importantes de dicho modelo son:

- los procesos de crecimiento
- los límites
- los retrasos
- los procesos de erosión

Ya hemos descrito los procesos de crecimiento de la población y el capital en el capítulo II. Los límites en el "mundo real" fueron discutidos en el capítulo III. Los límites tal como están representados en el World3, los retrasos y la erosión serán descritos a continuación. La cuestión de importancia que se debe tener presente a través de todos los razonamientos que seguirán en este libro es si, y en qué condiciones, hay paralelismos entre el modelo informático en cuestión y la población y la economía "reales", en la medida que el lector las conoce a través de su propio modelo mental.

Ilustración 4-6 ENERGÍA REQUERIDA PARA PRODUCIR METAL PURO DEL MINERAL

Miles de kilovatios hora por tonelada de metal



A medida que se reduce su contenido en metal, los minerales requieren una cantidad creciente de energía para su purificación. (Fuente: *N. J. Page y S. C. Creasey*).

Límites y ausencia de límites

Una economía en crecimiento exponencial que toma recursos de un medio ambiente finito y emite hacia él residuos, comienza a atenazar dicho medio ambiente mucho antes de alcanzar sus límites últimos. El medio comienza entonces a enviar señales y a presionar sobre la economía creciente: señales de mayor escasez de los recursos, presiones por parte de la acumulación de los residuos. Esas presiones y señales son bucles de retroalimentación negativa. Buscan regresar a la economía en línea con las restricciones del sistema que la rodea. Dicho de otra forma, pretenden frenar el crecimiento.

World3 contiene sólo cuatro límites físicos y biológicos. Todos ellos pueden ser elevados o reducidos por acciones, cambios y elecciones dentro del mundo modelizado. Estos límites son:

- *Tierra cultivable*, que se puede incrementar hasta un límite de 3.200 millones de hectáreas mediante la inversión en el desarrollo de tierras. Se supone que el coste de desarrollar nuevas tierras crece debido a que las extensiones más accesibles y rentables ya están en explotación. La tierra, además, puede ser eliminada del proceso de producción por la erosión y la urbanización.

- *El rendimiento obtenible en cada unidad de tierra*, que puede elevarse mediante insumos como los fertilizantes. Estos insumos tienen rendimientos decrecientes; cada kilogramo adicional de fertilizante produce menor rendimiento adicional que el kilogramo previo. Suponemos que el límite superior de rendimiento es un promedio mundial de 6.500 kilogramos de grano por hectárea, equivalente a los rendimientos más altos alcanzados por un solo país en la actualidad. World3 da por supuesto que el rendimiento de la tierra puede resultar reducido por la contaminación.

- *Recursos no renovables* tales como combustibles fósiles y minerales. Damos por supuesto que hay recursos suficientes para abastecer 200 años de extracción al ritmo de 1990. El coste de capital para encontrar y explotar recursos no renovables está previsto como factor ascendente, en la medida en que los depósitos más ricos y más convenientes se explotan en primer lugar.

- *La habilidad de la tierra para absorber la contaminación*, que incluye el supuesto de que la tierra se erosiona a medida que la contaminación se acumula, y que se puede regenerar si el nivel de contaminación decae. Desde el punto de vista cuantitativo éste es el límite menos conocido de todos. Se parte del supuesto de que si la contaminación se multiplica por 10 respecto de sus niveles globales de 1990, reduciría la expectativa de vida humana en sólo un 3% y aceleraría la degradación de la fertilidad de la tierra en un 30% (hemos comprobado otras estimaciones en el modelo para ver cuáles podrían ser sus efectos).

Desde luego que en el "mundo real" hay otra suerte de límites, incluidos los límites de gestión y sociales. Algunos de ellos están implícitos en las cifras del World3, ya que esos números provienen de la historia "real" del mundo en los últimos noventa años. Pero World3 carece de una guerra explícita, no tiene huelgas laborales, no hay corrupción, no hay barreras comerciales, y su población simulada hace lo mejor que puede para resolver los problemas percibidos, sin distraer fuerzas en luchas por el poder político. En la medida en que carece de muchos límites sociales, World3 bien puede pintar un cuadro excesivamente optimista acerca de las futuras opciones.

¿Qué pasaría en el caso de estar equivocados, por ejemplo, en la cantidad de recursos aún por descubrir? ¿Qué ocurriría si la cifra real fuese sólo la mitad de lo que hemos supuesto, o el doble, o 10 veces más? ¿Qué sería de la propuesta si la capacidad "real" de la tierra para absorber la contaminación sin hacer daño a la población humana no fuese 10 veces la tasa de emisión de 1990, sino 50 o 500 veces (o 0,5 veces)?

Un modelo de ordenador es un ingenio destinado a hacer pruebas, y todas esas preguntas condicionantes pueden ser comprobadas. Es posible, por ejemplo, adjudicar a las cifras de World3 valores astronómicamente altos. Incluso se los puede programar para que crezcan en forma exponencial. Los hemos comprobado, y también lo han hecho otras personas[76]. Cuando del modelo se eliminan todos los límites por el supuesto de una tecnología que es ilimitada y libre de costes y errores, la simulación de la economía humana crece mientras se permita al modelo funcionar. La ilustración 4-7 muestra qué es lo que ocurre. El crecimiento de la población se hace más lento y comienza a nivelarse en esta experiencia del modelo (alrededor de 15.000 millones de personas) a causa de la transición demográfica. La producción industrial crece por encima del cuadro del gráfico. En la simulación del año 2100 la economía global incrementa 55 veces su producción industrial y ocho veces la producción de alimentos respecto a 1990. Este crecimiento se alcanza mientras el mundo sólo utiliza un 5% de los recursos y la emisión de elementos contaminantes sólo crece en un 15% respecto a 1990. Para lograr estos resultados escasamente realistas el mundo debería acumular en el siglo XXI más de 60 veces el capital productivo acumulado en el siglo precedente.

Esta experiencia informa sobre algo referido al World3, algo acerca de la modelización, y muy poco, creemos, sobre el futuro del "mundo real". Lo que revela acerca del World3 es que éste ha construido dentro de su

Cómo leer los escenarios del World3

En los capítulos 4, 6 y 7 de este libro, mostraremos 14 distintos "ensayos de ordenador" o escenarios diferentes generados por el World3. Cada ensayo se inicia con la misma estructura básica del modelo y cambia algunas de las cifras para probar diferentes estimaciones de los parámetros del "mundo real", o para incorporar proyecciones más optimistas sobre el desarrollo de tecnologías, o para ver qué pasa si el mundo elige nuevas políticas, éticas u objetivos.

Cuando se añaden al modelo las nuevas cifras, se utiliza al World3 para calcular las interacciones entre todas sus 225 variables. El ordenador calcula un nuevo valor para cada variable cada seis meses en un tiempo simulado desde el año 1900 hasta el año 2100. De esta forma el modelo produce más de 90.000 variantes de cada escenario. No es posible reflejar toda esta información; hemos debido consolidarla y simplificarla para comprenderla nosotros mismos y para poder acercarla al lector.

Eso lo hemos hecho dibujando curvas sobre los gráficos temporales que representan sólo algunas variables clave, como población, contaminación y recursos naturales. Para este libro proveemos dos gráficos de esta naturaleza para cada escenario. El formato es el mismo para cada escenario que mostramos. El gráfico superior, denominado "Estado del mundo", es indicativo del peso total sobre el planeta. En él se muestran totales globales para:

población	nivel relativo de contaminación (1970 = 1)
producción de alimentos	fuentes no renovables restantes
producción industrial	

El segundo gráfico, titulado "Nivel de vida material", es indicativo del bienestar humano promedio. En él se muestran valores para:

producción de alimentos por persona	expectativa media de vida
consumo de bienes por persona	producción de servicios por persona

Hemos omitido los valores numéricos de las escalas verticales para estas nueve variables, ya que los valores precisos de cada punto en el tiempo no son significativos. En lugar de ello debe notar cómo cambia la forma de las curvas desde un conjunto de supuestos al otro. Para facilitar la comparación, hemos mantenido idénticas las escalas verticales para cada una de las nueve variables a lo largo de toda la ilustración 4-7 y en los 13 escenarios (la mayor parte de los cuales aparecen en los capítulos 6 y 7). De todas formas, dos variables en el mismo gráfico pueden estar dibujadas con escalas muy distintas y con unidades diferentes. Por ejemplo, la escala de la población va de 0 a 13 miles de millones de personas, mientras que la escala para las expectativas de vida va de 0 a 90 años.

propia estructura una capacidad autorrestrictiva sobre la población. La población podría eventualmente nivelarse, si la producción industrial *per cápita* se eleva lo suficiente. Pero el modelo no contiene restricciones autolimitantes sobre el capital. Vemos escasa evidencia en el "mundo real" acerca de la renuncia de las personas o naciones ricas a hacerse aún más ricas. Por lo tanto hemos dado por supuesto que los propietarios del capital continuarán intentando multiplicar su riqueza en forma indefinida y que los consumidores aspirarán a seguir aumentando su consumo. Esos supuestos pueden y deben ser modificados en los ensayos sobre política hechos con el modelo en el capítulo 7.

La ilustración 4-7 también demuestra que uno de los principios más básicos de la modelización: Entrada de Basura, Salida de Basura (EBASABA). (En inglés, en el original, *Garbage In, Garbage Out or GIGO*). El ordenador dará las consecuencias lógicas de los supuestos, pero no dirá si los supuestos son lógicos. Si se supone que la tierra es infinita y que los deseos humanos no pueden ser satisfechos, World3 le dará como resultado un crecimiento infinito. Hemos rotulado al ensayo de la Ilustración 4-7: Infinidad adentro, Infinidad fuera, abreviado como Ifa-Ifu (en inglés, en el original, *Infinity In, Infinity Out, Ifi-Ifo*). La cuestión más importante en torno a este ensayo con ordenador o a cualquier otro es no sólo si se cree en el comportamiento del modelo, sino si se cree en los supuestos que alimentan el proceso y dicho comportamiento, en este caso el supuesto de una tierra sin límites.

No creemos en el ensayo que se muestra en la ilustración 4-7. Bajo lo que podríamos calificar de supuestos más "realistas", el modelo comienza a mostrar el comportamiento de un sistema creciente que comienza a entrar en conflicto con los límites físicos.

Límites y retrasos

Una entidad física en crecimiento se detendrá exactamente sobre sus límites (en el crecimiento en S o sigmoideo), sólo si recibe señales precisas y oportunas diciéndole dónde se encuentra respecto de sus límites, y sólo si responde a esas señales con rapidez y precisión.

Por ejemplo, imagine que está conduciendo un coche y ve una luz de semáforo ponerse roja delante de usted. Puede hacer que el coche se detenga sin sobresaltos a la altura de la luz porque tiene una señal visual rápida, precisa, que le informa sobre dónde está la luz, porque su cerebro

responde rápidamente a la señal, porque su pie se mueve con rapidez cuando decide pisar el freno, y porque el coche responde al freno con una velocidad que usted conoce y ha tenido en cuenta.

Si el parabrisas de su coche estuviera empañado del lado del conductor y dependiera del pasajero a su lado para saber dónde está la luz del semáforo, el pequeño retraso en la comunicación podría hacer que usted sobrepasara el semáforo (a menos que redujera la velocidad para acomodarse al previsible retraso). Si el pasajero mintiera o si usted negara lo que oye, o si los frenos tardaran dos minutos en actuar, o si el coche tuviera tal inercia que necesitara cientos de metros para detenerse, se encontraría con problemas.

Un sistema no puede lograr un ajuste exacto a un límite si la señal de control se retrasa o está distorsionada, si se la ignora o se la niega, o si sólo puede responder tras un cierto retraso. Si cualquiera de esas condiciones son pertinentes, la entidad en crecimiento hará una corrección demasiado tardía y sobrepasará los límites (ilustración 4-8).

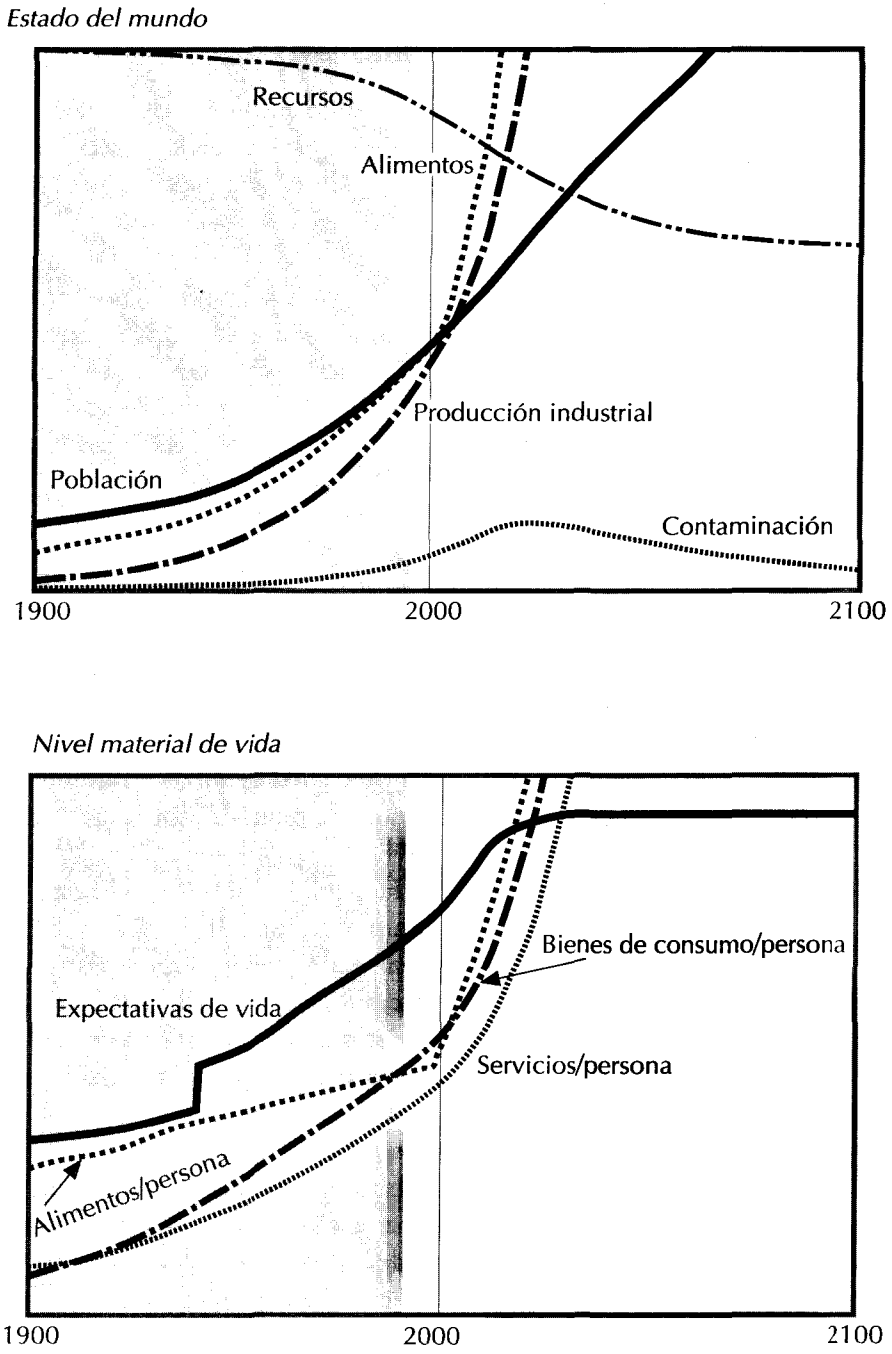
Ya hemos indicado dónde existen algunos retrasos de información y respuesta en el World3. Una de ellos es el retraso entre el tiempo en que un agente contaminante es liberado en la biosfera y el tiempo que tarda en hacer algún efecto nocivo mensurable a la salud humana o a la provisión de alimentos. Un ejemplo es el retraso de entre 15 y 20 años hasta que las moléculas de clorofluorocarbono liberadas en la superficie de la tierra comienzan a degradar la capa de ozono estratosférica, tal como se describe en el capítulo siguiente. Otro ejemplo es la lenta difusión a través del medio ambiente de las moléculas de PCB.

Desde 1929 la industria ha producido en torno a dos millones de toneladas de los denominados bifenilos policlorados (o PCBs), que son estables, aceitosos y no inflamables. Se los ha utilizado principalmente para disipar el calor en transformadores y acumuladores eléctricos; se los encuentra en cualquier parte del mundo donde haya tendidos eléctricos,

Ilustración 4-7 INFINIDAD DENTRO, INFINIDAD FUERA

Si todos los límites físicos del sistema World3 son eliminados, la población crece hasta los 15.000 millones de personas y se nivela en el proceso de transición demográfica. La economía crece hasta que en el año 2100 produce 55 veces más que el nivel de producción industrial de 1990, aunque utilizando sólo el 5% de los recursos no renovables y produciendo sólo un 15% más de contaminación.

ILUSTRACIÓN 4-7

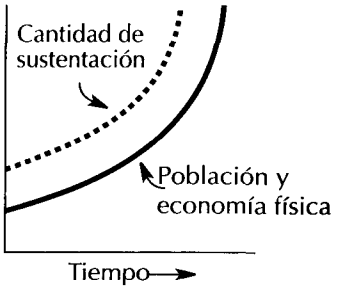


equipo eléctrico y equipo hidráulico. Durante 40 años los usuarios de estos agentes químicos los han vertido sobre el suelo, a lo largo de carreteras, en desagües y cursos de agua, sin pensar en las consecuencias para el medio ambiente. Hasta que una investigación ya histórica de 1966, diseñada para detectar el nivel de DDT en el medio ambiente, descubrió que además del DDT, había encontrado en forma generalizada moléculas de PCBs[77]. Desde entonces los PCBs se han encontrado prácticamente en todas partes.

> Los PCBs se encuentran en casi todos los componentes del ecosistema global. La hidrosfera es una importante fuente de PCBs atmosféricos... Los residuos de PCBs también se han detectado en los sedimentos de aguas de río, lagos y mares... Un estudio amplio del ecosistema de los Grandes Lagos ilustra claramente las bioconcentraciones preferentes de los residuos de PCBs en la cadena alimentaria[78].
>
> El DDT y el PCB son los únicos organoclorados que se han controlado sobre una base sistemática en los mamíferos marinos árticos... Los niveles de PCB en la leche materna de las mujeres de la tribu Inuit están entre los más altos que se han registrado... Un alto consumo de pescado y de mamíferos marinos es probablemente la principal ruta para la absorción de PCBs... Estos resultados sugieren que los compuestos tóxicos como los PCBs pueden jugar un papel destacado en la reducción de la inmunidad y en la alta incidencia de infecciones entre los niños Inuit[79].
>
> [En el Waddenzee sobre la costa de Holanda] el éxito reproductivo de las focas que reciben una dieta con un nivel más alto de PCBs decreció significativamente... [lo que demuestra que] el fracaso reproductivo en las focas comunes está relacionado con su alimentación con peces de esa región contaminada... Estos descubrimientos corroboran los resultados de experimentos con armiños, en los que la administración de PCB redujo la capacidad de reproducción[80].

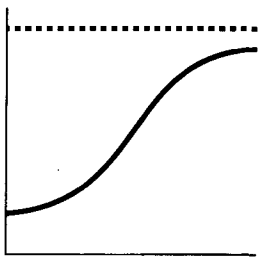
La mayor parte de los PCBs son relativamente insolubles en el agua pero solubles en grasas, y tienen una prolongada vida media en el medio ambiente. Se mueven con rapidez por la atmósfera, y con lentitud en los suelos o sedimentos en cursos de agua y lagos, hasta que son asimilados por alguna forma de vida, donde se acumulan en tejidos adi-

Ilustración 4-8 CAUSAS ESTRUCTURALES DE LOS CUATRO MODOS POSIBLES DE COMPORTAMIENTO DEL MODELO MUNDIAL



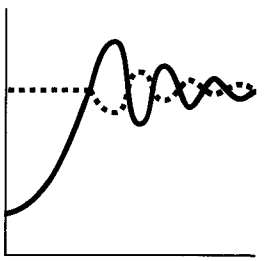
Se produce crecimiento continuo si:

- Los límites físicos están muy lejanos, o
- Los límites fijos crecen en sí mismos en forma exponencial.



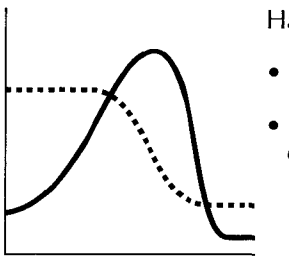
Se produce crecimiento sigmoideo si:

- Las señales de los límites físicos hacia la economía en crecimiento son instantáneos, precisos y se responde a ellos de inmediato, o
- La población o la economía se limitan a sí mismos sin necesitar señales de los límites externos.



Se produce sobrepasamiento y oscilación si:

- Las señales o respuestas se retrasan, y
- Los límites no son erosionables o son capaces de recuperarse rápidamente de la erosión.



Hay sobrepasamiento y colapso si:

- Se retrasan las señales o las respuestas, y
- Los límites son erosionables (degradados en forma irreversible cuando se los excede).

posos, e incrementan su concentración a medida que avanzan por la cadena alimenticia. Se los encuentra en mayor concentración en los peces carnívoros, aves marinas y mamíferos, grasa humana y leche materna humana. Interfieren en los procesos inmunológicos y funciones endocrinas, especialmente en los ciclos de reproducción y en el desarrollo de los fetos.

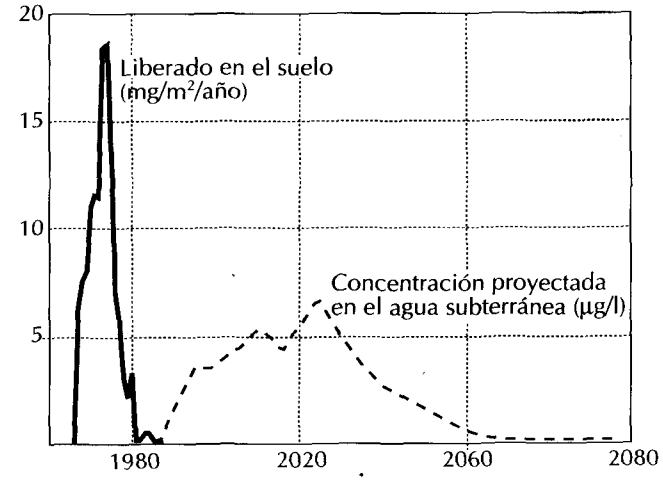
A causa de este lento movimiento y larga duración, características de bioacumulación, se ha bautizado a los PCBs de "bomba de tiempo biológica". A pesar de que la producción y utilización de los PCBs se ha prohibido en muchos países desde la década de 1970, sigue existiendo un gran *stock* del producto químico. Del volumen total de PCBs producidos, alrededor de un 70% se encuentran todavía en uso o almacenados en equipo eléctrico abandonado. En países dotados de legislación sobre los residuos de riesgo, existen esperanzas de que los residuos de PCBs se eliminen en forma controlada mediante la incineración. El 30% restante ha sido liberado al medio ambiente. Sólo el 1% ha alcanzado a los océanos; y es esa cantidad la que está ocasionando los efectos ya mensurables en peces, focas, pájaros y personas. El otro 29% se encuentra disperso en suelos, ríos y lagos, donde puede continuar moviéndose hacia criaturas vivientes durante décadas[81].

La ilustración 4-9 muestra otro ejemplo de retraso en contaminantes, el lento transporte de agentes químicos a través del suelo y hacia las aguas subterráneas. Desde la década de 1960 hasta 1990, en que fue finalmente prohibido, el desinfectante del suelo 1,2-dicloropropene (DCPe) se usaba intensamente en Holanda en el cultivo de patatas y bulbos de flores. Contiene un agente contaminante, el 1,2-dicloropropano (DCPa), el cual, hasta donde saben los científicos, tiene una sobrevida sumamente prolongada en el agua subterránea. Los cálculos hechos en un solo manantial muestran que el DCPa, que ya se encuentra en los suelos, se abrirá camino hacia las aguas subterráneas y comenzará a aparecer en concentraciones significativas pasado el año 2000. A partir de entonces contaminará las aguas subterráneas durante décadas en concentraciones de hasta 50 veces el nivel admitido para las aguas potables en Europa.

Un retraso en un segmento distinto del World3 se debe a la estructura de edad de la población. Una población con una historia reciente de alta tasa de natalidad tiene muchos más jóvenes que ancianos. De esta forma, aunque decaiga la tasa de fertilidad, la población sigue creciendo

Ilustración 4-9 LA LENTA FILTRACIÓN DEL 1,2-DCP EN LOS ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS

Concentración de 1,2-DCP



El desinfectante para suelos DCP se utilizó intensamente en Holanda en los años 80, luego se restringió su uso y, finalmente, se prohibió en 1990. Como consecuencia de ello, la concentración de DCP en los niveles altos de terreno agrícola decreció rápidamente. No obstante, su concentración en aguas superficiales sólo alcanzará su máximo en torno al año 2020, y seguirán existiendo cantidades significativas de este producto químico en el agua hasta pasada la mitad del siglo que viene.

durante décadas a medida que los niños alcanzan la edad de reproducción. A pesar de que la cantidad de niños por familia desciende, el número de familias aumenta. Debido a esta "inercia poblacional", si la fertilidad de toda la población mundial alcanza un nivel de reemplazo (alrededor de dos niños por familia en promedio) para el año 2010, la población seguirá creciendo hasta el año 2060 y se nivelará en torno a los 8.000 millones. Si la fertilidad de reemplazo se alcanzara a nivel mundial en el año 2035, la población continuaría creciendo hasta el año 2095 y sumaría alrededor de 10.000 millones[82].

En el sistema del "mundo real" hay muchos otros retrasos. Los recursos no renovables pueden ser drenados durante generaciones antes de que su tendencia al agotamiento tenga consecuencias económicas serias. El capital industrial no se puede construir de la noche a la

mañana. Una vez acumulado, su vida media es de décadas. Una refinería de petróleo no puede ser reconvertida rápida y fácilmente en una fábrica de tractores o en un hospital, o en una refinería más eficaz o menos contaminante.

World3 está repleto de retrasos en sus mecanismos de retroalimentación, incluidos todos los antes mencionados. Como en el caso de los PCB, damos por supuesto un retraso entre la liberación de los agentes contaminantes y su efecto visible sobre el sistema. Suponemos un retraso de alrededor de una generación antes de que las parejas ajusten plenamente sus decisiones sobre el tamaño familiar a las condiciones cambiantes de ingresos y mortandad infantil. Para que una nueva planta industrial destinada a aliviar la escasez de alimentos, mano de obra o servicios entre en funcionamiento son necesarias décadas. La regeneración de la fertilidad de los suelos lleva tiempo, al igual que la absorción de la contaminación.

No hemos incluido en el World3 el tiempo que lleva a los científicos comprender un problema, o a los Gobiernos adoptar una decisión, o cambiar los valores materiales. Tal como está, los retrasos físicos más sencillos e incontrovertibles son suficientes para eliminar el suave crecimiento sigmoideo como posible comportamiento para el sistema económico mundial. A causa de los retrasos en las señales sobre los límites de la naturaleza, si no hay límites autoimpuestos, es inevitable un *sobrepasamiento* de los mismos.

Si la señal de alarma de los límites hacia la entidad en crecimiento sufre retrasos, o si se demora la respuesta, y si el medio no resulta erosionado cuando está sobreexigido, entonces la entidad en crecimiento sobrepasará sus límites durante un cierto tiempo, hará correcciones, para sobrepasar una y otra vez esos límites en una serie de oscilaciones que habitualmente se estancan en un cierto equilibrio con el límite

El *sobrepasamiento* y la oscilación pueden ocurrir sólo si el medio puede soportar al sistema durante los periodos de sobrecarga o repararse a sí mismo con la suficiente rapidez como para recuperarse durante los periodos de menor tensión de carga.

Recursos renovables como bosques, suelos, peces, aguas subterráneas que se reponen, pueden ser erosionados, pero tienen capacidad de autorregeneración. Se pueden recuperar de un periodo de sobreexigencia, siempre que no sea excesivamente prolongado y que el daño hecho a la fuente de procreación, fuentes nutrientes o acuíferos no sea demasiado

devastador. Con tiempo, suelo, semillas y un clima sin mayores trastornos, un bosque puede volver a crecer. Una población de peces puede volver a regenerarse. Los suelos se pueden restablecer, especialmente con la asistencia activa de los productores. La acumulación de diversos tipos de contaminación se pueden reducir, si los mecanismos naturales de absorción del medio ambiente no han sido gravemente alterados.

Por lo tanto, el comportamiento de *sobrepasamiento* y oscilación es una posibilidad "real" para el sistema mundial. Ha sido demostrado en algunas regiones para algunos recursos. En Nueva Inglaterra, por ejemplo, se ha pasado por diversos periodos de construcción de más aserraderos que los que los bosques podían abastecer, agotando la madera explotable y provocando el cierre de aserraderos, para luego esperar décadas hasta que los bosques vuelven a crecer y repetir nuevamente la construcción de un exceso de aserraderos. La pesca costera de Noruega ha pasado al menos por un ciclo de agotamiento de peces, lo que llevó al Gobierno a adquirir parte de la flota pesquera hasta que las colonias de peces se regeneraran nuevamente.

El lado descendente de un *sobrepasamiento* y oscilación no es un periodo agradable para vivir. Puede suponer épocas duras para las industrias que dependen de un recurso del que se ha abusado o mala salud en la parte de la población expuesta a altos niveles de contaminación. Es mejor evitar las oscilaciones, pero éstas no son fatales para el sistema.

De todas formas, algunos sobrepasamientos son irreversibles. Nada puede reponer una especie extinguida. Los recursos no renovables como los combustibles fósiles son permanentemente destruidos en el mismo acto de su utilización. Algunas formas de contaminación, como la de los materiales radiactivos y los metales pesados tóxicos, no pueden ser convertidas en inocuas por mecanismos naturales. Incluso los recursos renovables y los procesos de absorción de los contaminantes pueden ser erosionados en forma permanente por la mala utilización sistemática o prolongada. Cuando los bosques tropicales son talados de forma tal que se impide su recuperación, cuando los niveles de las aguas saladas se infiltran en los acuíferos de agua potable, cuando los suelos se lavan y dejan a la vista sólo la roca, entonces la capacidad de transporte de la tierra se disminuye en forma permanente.

Por lo tanto, la modalidad de *sobrepasamiento* y oscilación no es la única que podría manifestarse a medida que la humanidad se aproxima a los límites de crecimiento. Hay una posibilidad más.

Sobrepasamiento y colapso

Si la señal de respuesta desde el límite se retrasa y si el medio ambiente ha sido erosionado en forma irreversible durante la fase de sobrecarga, entonces la economía en crecimiento sobrepasará su capacidad de transporte, degradará sus recursos básicos y se colapsará (ilustración 4-8).

El resultado de este *sobrepasamiento* y colapso es un medio empobrecido en forma permanente y un nivel material de vida mucho más bajo que el que hubiera sido posible si el medio nunca hubiera quedado sujeto a una sobrecarga.

La diferencia entre el comportamiento de *sobrepasamiento* y oscilación con el de *sobrepasamiento* y colapso es la presencia de los ciclos de erosión en un sistema. Éstos son bucles de retroalimentación positiva de la peor naturaleza. Normalmente están adormecidos, pero cuando una situación se hace mala, los ciclos la empeoran. Arrastran un sistema hacia abajo a un paso creciente.

Por ejemplo, las tierras de pastoreo de todo el mundo han evolucionado conjuntamente con los animales hervíboros, desde el ciervo hasta el búfalo, pasando por el antílope y el canguro. Cuando la hierba es arrancada por los animales, las raíces y tallos remanentes extraen más agua y nutrientes del suelo y hacen crecer más hierba. El número de animales pastoreando se mantiene merced a los depredadores de estas especies y a las migraciones anuales. El ecosistema no se erosiona. Pero si se elimina a los depredadores, o las migraciones cesan o disminuyen, o la tierra está excesivamente poblada, una sobrepoblación de animales puede eliminar la hierba hasta la raíz.

Cuanta menos vegetación haya, menor cobertura hay para los suelos. El suelo comienza a ser lavado por el agua o aventado por los vientos. Cuanta menos tierra, menos vegetación puede crecer, lo que permite una erosión de los suelos aún mayor. Y así sucesivamente. La fertilidad de la tierra cae en espiral hasta que las zonas de pastoreo se desertizan.

Hay varios ciclos de erosión en World3 semejantes a los de desertización que acabamos de describir. He aquí algunos otros:

- Si la gente está hambrienta, pueden trabajar la tierra en forma mucho más intensiva para producir más en menos tiempo a expensas de la inversión en el mantenimiento a largo plazo de la tierra. De esta forma una menor cantidad de alimento conduce a una reducción en la fertilidad del suelo, lo que hace disminuir aún más la cantidad de alimentos disponibles.

- Cuando aparecen problemas que requieren productos industriales —equipo para reducir la contaminación, por ejemplo, o más insumos agrícolas, o equipo para detectar y explotar recursos no renovables—, la inversión disponible puede estar asignada a la resolución de problemas inmediatos, más que a combatir la depreciación. Si el capital de la planta industrial establecida comienza a deteriorarse, la cantidad de producto industrial disponible para problemas inmediatos es todavía menor, lo que puede desembocar en posponer nuevamente la reposición de capital, y una mayor erosión en el *stock* de capital.

- Si en una economía debilitada decrecen los servicios *per cápita*, los gastos en planificación familiar pueden fracasar, provocando un incremento en las tasas de natalidad y haciendo caer aún más los servicios *per cápita*.

- Si los niveles de contaminación crecen en exceso, acabarán contaminando a los mismos mecanismos de absorción de contaminación, con lo cual se incrementará el ritmo de acumulación de la contaminación todavía más.

Este último mecanismo de erosión, que contamina a los mecanismos naturales de absorción de la contaminación, es particularmente insidioso, y es un fenómeno del que teníamos poca evidencia cuando lo postulamos por primera vez hace veinte años. En esa época teníamos en mente interacciones tales como el vertido de pesticidas a los cursos de agua, con lo que se mataba a los organismos que habitualmente purifican el agua de desperdicios orgánicos; o la emisión hacia el aire de óxidos de nitrógeno y productos químicos orgánicos volátiles, que reaccionan entre sí para formar más niebla fotoquímica dañina.

Desde entonces, otros ejemplos de la degradación de los propios mecanismos de control de la contaminación del planeta han salido a la luz. Uno de ellos es la aparente capacidad de los contaminantes del aire a corto plazo, como el monóxido de carbono, de eliminar los radicales hidróxilos del aire. Estos radicales hidróxilos normalmente reaccionan y destruyen al gas de efecto de invernadero metano. Cuando la contaminación del aire los elimina de la atmósfera, la concentración de metano aumenta en forma sensible. La contaminación del aire puede destruir un mecanismo de limpieza y hacer que el cambio global del clima sea aún peor[83].

Otro proceso de esta naturaleza es la capacidad de los contaminantes del aire para destruir o debilitar los bosques, lo que a su vez disminuye uno de los principales sumideros para el gas dióxido de carbono de efecto invernadero. El tercero es el efecto de la acidificación —de los fertilizantes o de la lluvia ácida— sobre los suelos. A niveles normales de acidez, los suelos son absorbentes de la contaminación. Pueden ceñir y sustraer metales pesados. Pero esos lazos se rompen en condiciones de acidificación. A medida que los suelos se acidifican, los metales pesados tóxicos, acumulados y almacenados durante largos periodos de tiempo (digamos desde décadas hasta un siglo) pueden ser movilizados y drenados con rapidez hacia aguas de superficie y subterráneas o ser absorbidos por las plantas. La presente acidificación de los suelos europeos a raíz de la deposición ácida es claramente una fuente de preocupación real con respecto al drenaje de metales pesados hacia las fuentes de agua[84].

Hay más bucles de erosión de retroalimentación positiva sobre el "mundo real" que los que se han incluido en World3, en especial la erosión social, en la que una ruptura en el orden social se alimenta a sí misma para crear más ruptura. Es difícil cuantificar los mecanismos de erosión de cualquier tipo. La erosión es un fenómeno de sistema completo. Tiene que ver con las interacciones entre fuerzas múltiples. Sólo aparece en épocas de gran tensión, y para cuando se hace evidente raramente hay oportunidad de estudiarlo o detenerlo. Cualquiera que sea su naturaleza precisa, de todas formas, si existe alguna posibilidad de que un sistema contenga un proceso latente de erosión, entonces ese sistema tiene la posibilidad, si se encuentra sobrecargado, de colapsarse.

A una escala local, el *sobrepasamiento* y colapso pueden verse en los procesos de desertización, agotamiento de aguas subterráneas o minerales, envenenamiento del suelo o de los bosques por residuos tóxicos de larga existencia. Legiones de civilizaciones fracasadas, granjas abandonadas, ciudades cuyo auge ha dejado mudos restos, y tierras industriales tóxicas abandonadas son testimonio de la "realidad" del comportamiento de este sistema. A una escala global, el *sobrepasamiento* y el colapso pueden suponer la ruptura de los grandes ciclos de apoyo de la naturaleza que regulan el clima, purifican el aire y el agua, regeneran la biomasa, preservan la biodiversidad y convierten a los residuos en nutrientes. Hace veinte años pocas personas hubieran creído que era posible el colapso ecológico a semejante escala. Ahora es el tópico de reuniones científicas y negociaciones internacionales.

En el mundo simulado de World3 la ética industrial es de crecimiento económico continuado. La población del World3 cesará de crecer sólo cuando sea lo suficientemente rica. Sus recursos básicos son limitados y erosionables. Los bucles de retroalimentación que conectan e informan las decisiones en el sistema World3 contienen muchas demoras sustanciales, y los procesos físicos tienen una inercia considerable. No debería ser ninguna sorpresa que el modo de conducta más habitual de este modelo del mundo sea el *sobrepasamiento* y el colapso.

Por ejemplo, los gráficos del escenario 1 muestran el comportamiento del World3 cuando funciona "tal cual es", con números que consideramos "realistas", y sin cambios técnicos y políticos inusuales. Este producto de ordenador puede servir como una referencia frente a la que se pueden comparar escenarios que ponen a prueba cambios de política y valores alternativos para números inciertos. Por eso hace veinte años lo denominamos "ensayo de referencia" o "ensayo estándar". No lo consideramos como el desenlace más probable, y desde luego no lo consideramos como una predicción. Es sólo una de las muchas posibilidades. Pero muchas personas atribuyeron al "ensayo estándar" mayor importancia que a los muchos escenarios que siguieron. Para impedir que eso vuelva a ocurrir esta vez, denominaremos a este ensayo de otra forma. Le llamaremos escenario 1.

En el escenario 1 la sociedad actual prosigue su trayectoria histórica tanto como le sea posible sin ningún cambio sustancial de política. Los avances tecnológicos en la agricultura, la industria y los servicios sociales se desarrollan de acuerdo con los moldes preestablecidos. No hay ningún esfuerzo extraordinario para reducir la contaminación o conservar los recursos. El mundo simulado intenta llevar a toda la población a través de la transición demográfica y dentro de una economía industrial y luego posindustrial. Este mundo adquiere sistemas sanitarios y de control de la natalidad generalizados a medida que crece el sector servicios; aplica más insumos agrícolas y obtiene mayores rendimientos a medida que crece el sector agrícola; emite más elementos contaminantes y demanda más recursos no renovables a medida que crece el sector industrial.

La población global del escenario 1 se eleva de 1.600 millones en el año simulado 1900 hasta más de 5.000 millones en el año simulado 1990, y por encima de los 6.000 millones en el año 2000. La producción industrial total se expande por un factor de 20 entre 1900 y 1990. Entre 1900 y 1990 sólo el 20% del *stock* total de recursos no renovables de la tierra es utilizado; el 80% de dichos recursos sigue existiendo en 1990. La contaminación en

ese año acaba de iniciar un incremento significativo. La producción industrial promedio *per cápita* en 1990 tiene un valor de 260 dólares por persona y año, una cifra útil de recordar para comparar en los ensayos futuros[85]. La expectativa de vida está creciendo, y también la producción de alimentos. Pero los grandes cambios se vislumbran un poco más adelante.

En este escenario el crecimiento de la economía se detiene e invierte a causa de una combinación de límites. Poco después de la simulación del año 2000 la contaminación se eleva lo suficiente como para comenzar a afectar seriamente a la fertilidad de la tierra. (Esto podría ocurrir en el "mundo real" a través de la contaminación por metales pesados o productos químicos persistentes, a través del cambio climatológico, o por un incremento de las radiaciones ultravioletas a causa de una capa de ozono disminuida). La fertilidad de la tierra ha caído en sólo un 5% entre 1970 y el año 2000, pero se está degradando a un ritmo del 4,5% anual en el año 2010 y al 12% anual en el 2040. Al mismo tiempo se incrementa la erosión de la tierra. La producción total de alimentos comienza a caer después del año 2015. Ese factor determina que la economía destine un mayor flujo de inversión hacia el sector agrícola para mantener la producción. Pero la agricultura debe competir por la inversión con un sector de recursos que también comienza a sentir algunos límites.

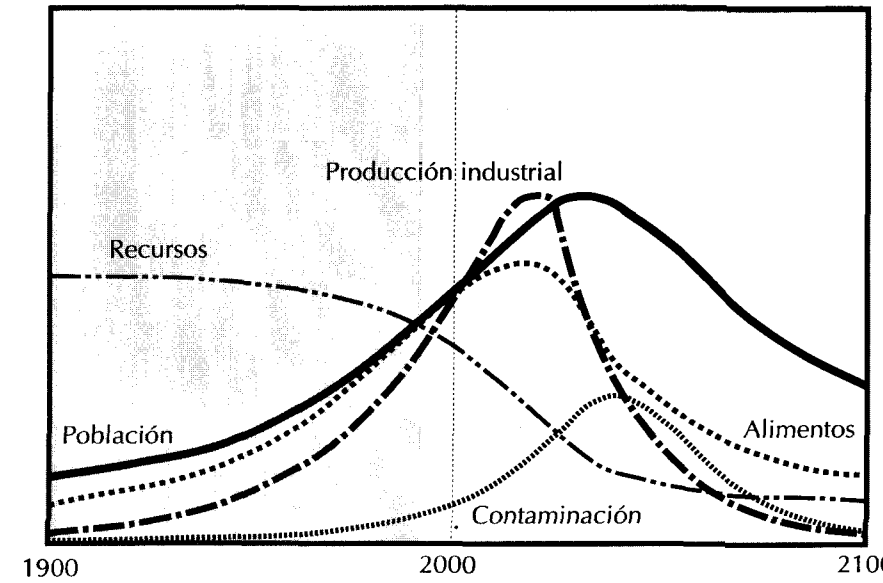
En 1990 los recursos no renovables restantes en el suelo durarían 110 años al ritmo de consumo de 1990. No habría a la vista serios límites a los recursos. Pero para el 2020 los recursos restantes constituirían tan sólo una reserva de 30 años. ¿A qué se debe que esta escasez haya surgido en forma tan precipitada? Esencialmente a que el crecimiento exponencial aumenta el consumo y reduce los recursos. Entre 1990 y el 2020 la población crece en un 50% y el producto industrial crece un 85%. La tasa de utilización de recursos no renovables se duplica. Durante las primeras dos décadas de la

Escenario 1 EL "ENSAYO ESTÁNDAR" DE *LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO*

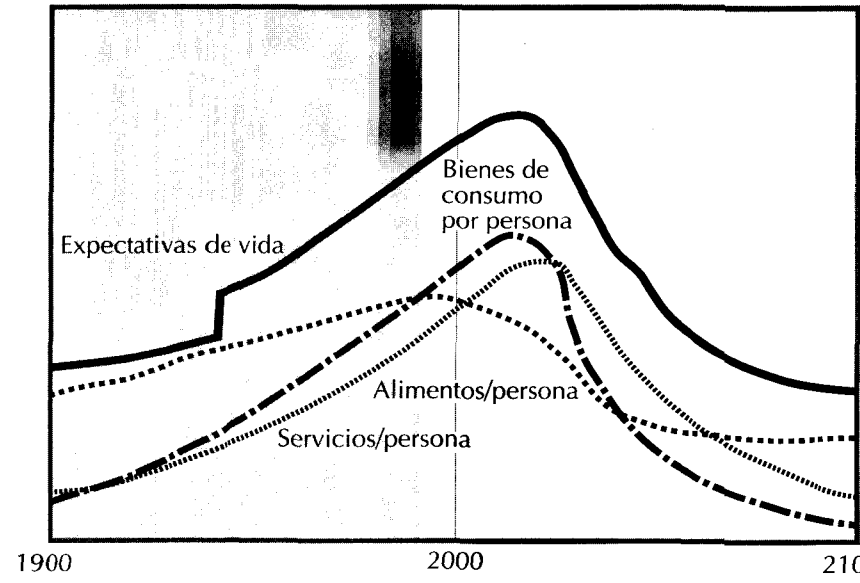
La sociedad mundial se mantiene en su senda histórica mientras le sea posible sin cambios de política fundamentales. Crecen la producción industrial y la población hasta que una combinación de restricciones del medio ambiente y de los recursos naturales eliminan la capacidad del sector de capital para sostener la inversión. El capital industrial comienza a depreciarse con mayor rapidez que lo que la nueva inversión puede reconstruir. A medida que cae, los servicios sanitarios y los alimentos también caen, reduciendo las expectativas de vida y elevando la tasa de mortandad.

ESCENARIO 1

Estado del mundo



Nivel material de vida



simulación del siglo XXI, la creciente población y parque industrial en el escenario 1 usa tantos recursos no renovables como la economía global usó en todo el siglo anterior. Se utilizan tantos recursos que son necesarios mucha más energía y capital para encontrar, extraer y refinar lo que queda.

A medida que tanto los alimentos como los recursos no renovables se hacen más difíciles de obtener en esta simulación del mundo, se deriva capital para producir más de ambos. Eso deja un menor nivel de productos para la inversión en el desarrollo del capital básico.

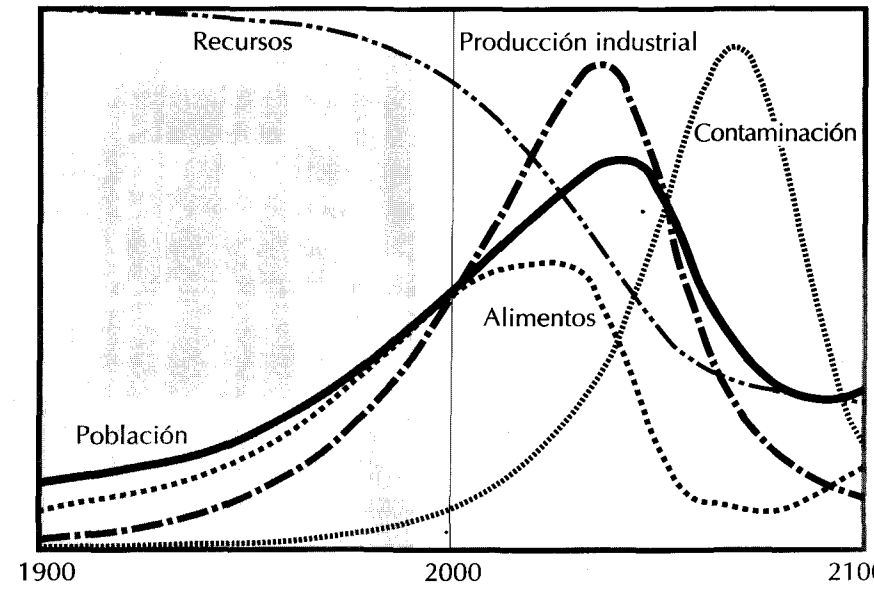
Finalmente la inversión no puede mantener el paso de la depreciación (se trata de una depreciación e inversión física y no monetaria). La economía no puede parar de derivar capital hacia los sectores agrícola y de recursos; si lo hiciera, la escasez de alimentos, materiales y combustibles restringiría la producción todavía más. De esta forma el parque industrial comienza a decaer, arrastrando consigo a los sectores de servicios y agrícola, que dependen de los insumos industriales. Durante un breve tiempo la situación es especialmente seria, en tanto que la población continúa creciendo, debido a los retrasos inherentes a la estructura de edad y al proceso de ajuste social. Finalmente también la población comienza a decrecer, a medida que la tasa de mortandad sube por la falta de servicios sanitarios y alimentos.

Este escenario no es una predicción. No tiene por objetivo prever valores precisos de ninguna de las variables del modelo en el futuro, ni la escala temporal precisa de los acontecimientos; ni, creemos, representa necesariamente el desenlace más probable del "mundo real". (Mostraremos otra posibilidad dentro de un momento, y muchas más en los capítulos 6 y 7). Lo que con mayor seguridad podemos afirmar sobre el escenario 1 es que retrata el modo de comportamiento general más probable del sistema, si las políticas que influyen en el crecimiento económico y el crecimiento de la población en el futuro son similares a las del pasado, si las modificaciones en la tecnología y en los valores continúan

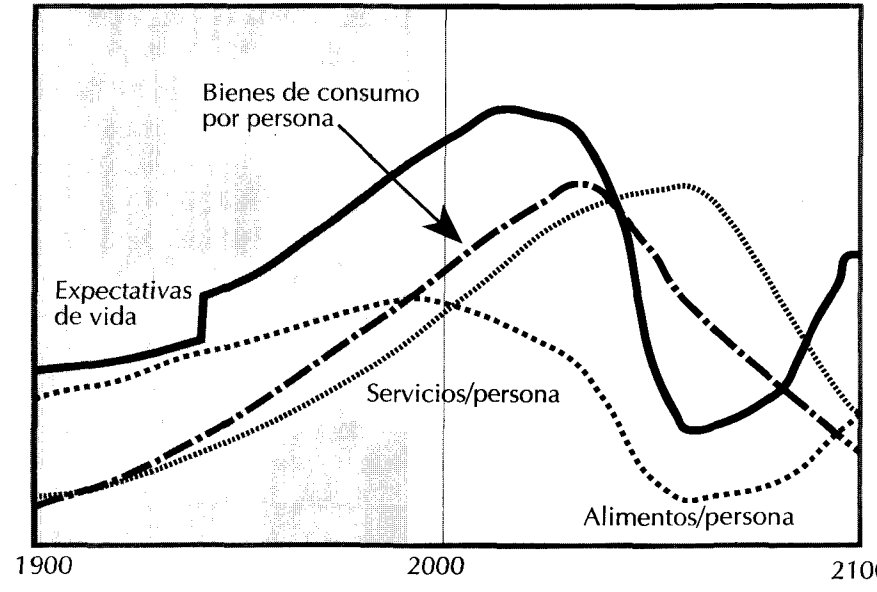
Escenario 2 SE DUPLICAN LOS RECURSOS DEL ESCENARIO 1

Si se duplican los recursos potenciales que fueron estimados en el escenario 1, la industria puede continuar su crecimiento durante otros veinte años más. La población se eleva a más de 9.000 millones en el 2040. Estos niveles incrementados generan mucha más contaminación, que reduce el rendimiento de la tierra y fuerza una mucho mayor inversión en la agricultura. Eventualmente la cantidad declinante de alimentos eleva la tasa de mortandad de la población.

Estado del mundo



Nivel material de vida



evolucionando en la forma que ahora prevalece, y si los números inciertos en el modelo son correctos a grandes rasgos.

¿Qué ocurriría si no son correctos? Ya que muchos de los números críticos (tales como la cantidad de recursos no renovables que todavía deberán ser descubiertos) simplemente no pueden ser conocidos, el modelo puede ser utilizado para comprobar el rango de incertidumbre, para ver qué diferencias existirían si, por ejemplo, hay el doble de recursos no renovables que nosotros hemos estimado esperando bajo tierra a ser descubiertos. El ensayo se muestra en el escenario 2.

Tal como se puede ver, los recursos duran bastante más en esta simulación de lo que duraban en el escenario 1. Pero el comportamiento general del modelo sigue sobrepasado y en colapso. Esta vez la situación de colapso deviene de una combinación diferente de razones.

Los recursos adicionales permiten a la industria crecer durante veinte años más que en el escenario 1. También la población crece más, alcanzando un total de casi 9.500 millones de personas en la simulación del año 2040. Mayores tasas de producción industrial ocasionan una mayor contaminación; la contaminación en el escenario 2 alcanza su máximo unos treinta años más tarde que en el escenario 1, y a un nivel más de tres veces superior. Parte del alza se debe a la generación de mayores tasas de contaminación, y parte se debe al hecho de que los procesos simulados de asimilación de la contaminación de la tierra se encuentran ya afectados. En el momento culminante de la contaminación en el año 2070 la vida promedio de los agentes contaminantes en el medio ambiente se ha más que duplicado.

La contaminación tiene un importante efecto sobre la fertilidad de la tierra, que declina dramáticamente. Las inversiones en agricultura aumentan con el objetivo de combatir esas pérdidas, pero la producción de alimentos sigue decreciendo en forma aguda. Las tasas de mortandad se elevan a causa de la escasez de alimentos. El crecimiento del capital se detiene a medida que la inversión se deriva hacia la agricultura y eventualmente también hacia un sector de recursos no renovables ya en estado de agotamiento.

¿Cuál es el futuro más probable, el del escenario 1 o el del escenario 2? Si existiese una forma científica de responder a esa pregunta, dependería de la evidencia acerca de la cantidad "real" de recursos no renovables aún por descubrir. Pero en realidad, la pregunta de si es más "realista" el escenario 1 o el escenario 2 no merece un debate. Ninguno de los dos es "realista". Nadie puede predecir un futuro en el cual los seres humanos puedan modificar sus reacciones ante los acontecimientos, puedan predecir los acontecimientos y puedan modificar la estructura de su sistema. Hay muchos otros números inciertos para probar, y muchas políticas técnicas y sociales que comprobar. Las abordaremos en los capítulos 6 y 7. Todo lo que el World3 nos ha dicho hasta el momento es que el modelo del sistema, y por implicación el sistema del "mundo real", tiene una fuerte tendencia a sobrepasar sus límites y colapsarse. En realidad, en los miles de ensayos con el modelo que hemos intentado a lo largo de los años, el *sobrepasamiento* y posterior colapso ha sido con mucho el resultado más frecuente. A estas alturas, las razones para estos resultados deberían estar bastante claras.

Por qué sobrepasamiento y colapso

Una población y una economía están en una modalidad de *sobrepasamiento* cuando están explotando recursos o emitiendo contaminantes a un ritmo insostenible, pero las tensiones a que se está sometiendo al sistema que soporta esa actividad no son aún lo suficientemente fuertes como para reducir las tasas de extracción o de emisión. El *sobrepasamiento* deriva del retraso en la retroalimentación —del hecho de que los que toman las decisiones en el sistema no reciben, creen o actúan sobre la información que señala el traspaso de los límites hasta mucho después de que han sido sobrepasados.

El *sobrepasamiento* sólo es posible porque hay *stocks* de recursos acumulados a los que se puede acudir. Se puede talar un bosque a un ritmo mayor que su tasa anual de reposición durante bastante tiempo, debido a que hay un *stock* disponible de madera en el bosque que se ha desarrollado durante décadas o siglos. Se pueden criar suficientes manadas de hervíboros como para que se exceda la capacidad de crecimiento de las tierras de pastoreo, o flotas pesqueras capaces de una depresión de los mares, porque hay una acumulación de forrajes y de peces que no fueron explotados en el pasado. Cuanto más grandes sean los *stocks* acumulados, más grande y prolongado puede ser el *sobrepasamiento*. Si una sociedad toma sus señales de los *stocks* disponibles, en lugar de su tamaño, calidad, diversidad, salud y tasa de reposición, está condenada al *sobrepasamiento*.

La inercia física ocasiona un retraso no en las señales de alarma, sino en la respuesta a las señales. Debido al tiempo que necesita el crecimiento de los bosques, el envejecimiento de la población, el recorrido de los agentes contaminantes a través del ecosistema, la depuración de las aguas contaminadas, la depreciación del parque de capital, la educación o el entrenamiento de la gente para nuevas tareas, el sistema económico no puede cambiar de la noche

a la mañana, aun cuando reciba y reconozca señales claras y oportunas indicándole que lo debe hacer. Para maniobrar adecuadamente, un sistema con una inercia física inherente debe prever con décadas de anticipación.

El último contribuyente al *sobrepasamiento* es el crecimiento. Si está conduciendo un coche con los cristales empañados o frenos defectuosos, lo primero que hará para evitar sobrepasar un límite es reducir la velocidad. Desde luego no insistirá en incrementar la aceleración. Los retrasos en la retroalimentación pueden gestionarse, mientras el sistema no se mueva demasiado rápido como para recibir y responder a una señal antes de que la siguiente aparezca en escena. La aceleración constante llevará a cualquier sistema a un punto en el cual ya no podrá responder a tiempo. Incluso un coche y un chófer en perfectas condiciones carecen de seguridad si van a alta velocidad. Cuanto más rápido es el crecimiento, más alto el *sobrepasamiento*, y más fuerte la caída.

Lo que finalmente convierte el *sobrepasamiento* en colapso es la erosión, asistida por los procesos no lineales. La erosión es una sobrecarga de tensión sobre el sistema que se multiplica a sí misma si no se le pone remedio con rapidez. Los procesos no lineales, como los que se muestran en las ilustraciones 4-1 y 4-6 son equivalentes a umbrales, tras los cuales el comportamiento de un sistema cambia de golpe. La provisión de alimentos de una población puede reducirse sin que tenga efectos mensurables sobre la salud durante largo tiempo, pero si los alimentos por persona caen por debajo de cierto límite, la tasa de mortandad se eleva en forma considerable. Un país puede extraer mineral de cobre de un tenor decreciente de concentración, pero debajo de cierto grado de concentración los costes de la minería se elevan en forma considerable. Los suelos se pueden erosionar sin tener efectos considerables sobre el rendimiento de las cosechas hasta aquel punto en que la capa de tierra tiene menor espesor que la longitud de las raíces que debe albergar. La presencia de los umbrales hace que las consecuencias de la retroalimentación de los retrasos sean aún más graves. Si usted está conduciendo ese coche con los cristales empañados y frenos defectuosos, las curvas en la carretera le obligarán a ir todavía más despacio.

Cualquier sistema de población-economía-medio ambiente que padece retrasos de retroalimentación y respuestas físicas lentas, que tiene umbrales y mecanismos de erosión, es literalmente ingestionable. No importa cuán brillantes sean las tecnologías, cuán eficiente sea la economía, cuán inteligentes sean sus gestores, simplemente no estará en condiciones de apartarse de los riesgos a menos que compruebe sus límites muy, muy despacio. Si pretende acelerar constantemente, está condenado al *sobrepasamiento.*

Por definición, *sobrepasamiento* es una condición en la cual las señales retardadas del medio ambiente no son aún lo suficientemente fuertes como para forzar el fin del crecimiento. Entonces, ¿cómo puede una sociedad decir que se ha sobrepasado? La caída de las fuentes de recursos y la creciente contaminación de los sumideros son las primeras claves. He aquí algunas otras:

- Capital, recursos y trabajo deben ser derivados de la producción de bienes finales hacia la explotación de recursos más distantes, más profundos, más escasos, o fuentes más diluidas.

- Capital, recursos y trabajo deben ser derivados de la producción de bienes finales hacia actividades que compensan lo que antes eran servicios gratuitos brindados por la naturaleza (por ejemplo, tratamiento de aguas cloacales, depuración del aire, control de las inundaciones, control de plagas, restauración de nutrientes del suelo, polinización, o la preservación de las especies).

- Capital, recursos y trabajo son utilizados para proteger, defender u obtener acceso a recursos que se encuentran concentrados en forma creciente en algunos escasos sitios restantes.

- Los mecanismos de limpieza natural de la contaminación comienzan a fallar.

- Se permite que la depreciación del capital supere a la inversión, o se difiere el mantenimiento, con lo cual hay deterioro de los *stocks* de capital, especialmente en las infraestructuras de vida prolongada.

- La inversión en recursos humanos (educación, salud, vivienda) decrece para hacer frente a necesidades inmediatas de consumo o pagar deudas.

- Las deudas constituyen un porcentaje más alto del producto real anual.

- Se incrementan los conflictos, especialmente conflictos sobre las fuentes o sumideros. Hay menor solidaridad social, más atesoramiento de bienes, brechas más amplias entre los que tienen y los que no tienen.

Un periodo de *sobrepasamiento* no debe necesariamente acabar en colapso. Sin embargo, reclama una acción rápida y determinada si se desea evitar el colapso. La base de recursos debe ser protegida rápidamente. Se debe reducir drásticamente la explotación de esas fuentes. Eso no implica la reducción del capital, de la población o de los niveles de vida, aunque sí significa ciertamente reducir su crecimiento toda vez que sea posible. Lo que sí se debe reducir en forma rápida es los insumos globales energéticos y materiales. Afortunadamente (en un sentido perverso) hay tal cantidad de desperdicio e ineficacia en la actual economía global, que existe un tremendo potencial para reducir los insumos mientras por otra parte se incrementa la calidad de vida. La siguiente tarea es la reestructuración del sistema de tal suerte que el *sobrepasamiento* no vuelva a ocurrir.

Resumiendo, he aquí los supuestos centrales del modelo World3, que le dan una fuerte tendencia a sobrepasarse y colapsarse. Puede decidir por usted mismo si son también características propias del "mundo real".

- El crecimiento es inherente al sistema de valores humanos, y el crecimiento, tanto de la población como de la economía, cuando ocurre, es exponencial.

- Hay límites físicos para las fuentes de materiales y energía que sostienen a la población humana y a su economía, y también hay límites a los sumideros que absorben los productos de desechos de la actividad humana.

- La población y economía crecientes reciben señales sobre los límites físicos con retraso y distorsionadas. La respuesta a dichas señales también se retrasa.

- Los límites del sistema no son sólo finitos, sino erosionables cuando están sometidos a una sobrecarga o a una sobreexplotación.

Si esas son las causas del *sobrepasamiento* y el colapso, también existen llaves para evitar ese comportamiento. Para modificar el sistema, para hacerlo gestionable y sostenible, se pueden invertir los mismos rasgos estructurales:

- Los insumos globales de energía y materiales se pueden reducir incrementando su eficiencia.

- Se pueden elevar los límites tanto como sea posible mediante técnicas al alcance del hombre.

- Se pueden mejorar las señales y acelerar las reacciones; la sociedad puede mirar más adelante cuando evalúa los costes y beneficios de las elecciones actuales.

- Se puede prevenir la erosión y, donde ya existe, se la puede revertir.

- El crecimiento de la población y del capital puede hacerse más lento y eventualmente detenerse.

En los capítulos 6 y 7 mostraremos los efectos de dichos cambios en el sistema World3. Pero antes, una breve digresión para una historia que ilustra todos los principios dinámicos que hemos presentado en este capítulo.

Capítulo 5:

REGRESANDO DESDE MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES: LA HISTORIA DEL OZONO

Nos encontramos, de una u otra forma, en medio de un experimento a gran escala para cambiar la construcción química de la estratosfera, a pesar de que no tenemos una idea muy clara de cuáles pueden ser sus consecuencias biológicas o meteorológicas.

F. SHERWOOD ROWLAND[8]

La humanidad ha sobrepasado recientemente un claro límite del medio ambiente, lo ha descubierto y se ha retirado de él: la destrucción de la capa de ozono de la estratosfera. La historia del ozono es esperanzadora, al menos hasta el momento. Muestra a los pueblos y las naciones del mundo en su mejor aspecto colectivo, aunque también pone de relieve algunos fallos humanos comunes.

Los científicos detectaron las primeras advertencias sobre la desaparición de la capa de ozono y superaron las barreras políticas para constituir una impresionante fuerza para la recolección de saber. Pero sólo fueron capaces de encarar esa labor cuando lograron ver más allá de sus propias antiparras perceptivas. Los gobiernos y las corporaciones actuaron al principio de forma dubitativa y renqueante, pero finalmente, algunos de entre ellos se presentaron como verdaderos líderes. Los expertos en medio ambiente fueron calificados de alarmistas, cuando lo cierto es que subestimaron el problema.

Naciones Unidas mostró en esta historia su potencial para hacer circular alrededor del mundo información crucial, y para proveer un territorio neutral y medios sofisticados mientras los gobiernos se hacían cargo de un problema que es innegablemente internacional. Las naciones del Tercer Mundo encontraron en la crisis del ozono un nuevo poder para

actuar en su propio beneficio, negándose a cooperar hasta que no se les garantizase apoyo técnico y financiero para esa cooperación.

Al final, las naciones del mundo reconocieron que habían transgredido un límite serio. Con sobriedad y reticencia, acordaron abandonar un producto industrial útil y rentable. Lo hicieron antes de que hubiera cualquier daño económico, ecológico o humano mensurable y antes de que hubiera plena certidumbre científica. Puede que lo hayan hecho a tiempo.

El crecimiento

Los clorofluorocarbonos (CFC) son uno de los compuestos más útiles que jamás haya inventado el ingenio humano (ver cuadro 5-1). No son tóxicos y son estables. No se queman ni reaccionan con otras sustancias, ni corroen los materiales. Dado que tienen una escasa conducción térmica, son excelentes aislantes cuando se los inyecta en espuma plástica para contener bebidas calientes, envasar hamburguesas o aislar paredes. Algunos CFC se evaporan y vuelven a condensar a temperatura ambiente, lo que los convierte en buenos refrigerantes para frigoríficos y equipos de aire acondicionado. (Para ese uso se los conoce bajo el nombre comercial de Freón). Los CFC son buenos solventes para la limpieza de metales, desde los intrincados espacios de los circuitos impresos hasta las piezas de aviones. Los CFC son baratos de producir, y se los puede eliminar en forma segura —o al menos eso era lo que todos pensaban— simplemente dejándolos libres en la atmósfera.

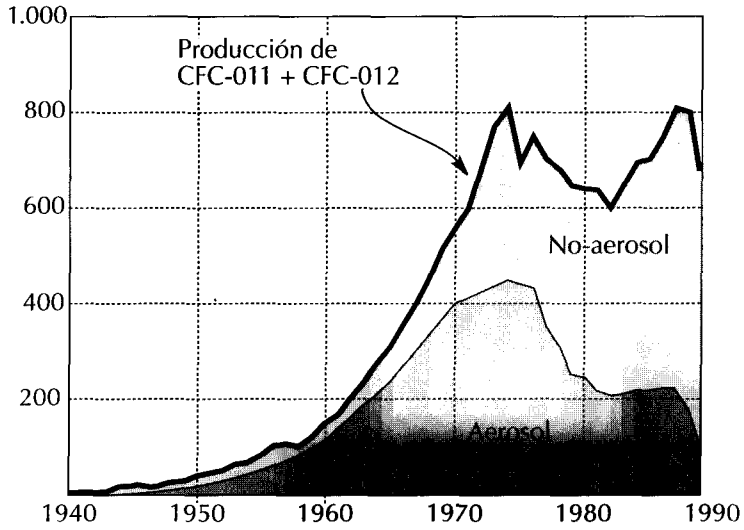
Tal como muestra la ilustración 5-1, desde 1950 hasta 1975 la producción mundial de CFC creció a un ritmo de entre el 7% y el 10% anual, duplicándose cada década o poco menos. Para la década de 1980 se fabricaban en el mundo un millón de toneladas de CFC al año. Sólo en Estados Unidos los refrigerantes basados en CFC funcionaban en 100 millones de frigoríficos, 30 millones de congeladoras, 45 millones de equipos de aire acondicionado domésticos, 90 millones de acondicionadores de coches, y en cientos de millones de equipos de refrigeración en restaurantes, supermercados y camiones refrigerados[87]. El americano o europeo medio usa en torno a 0,85 kilogramos de CFC por año. El habitante medio de China o India estaba utilizando menos de 0,03 kilogramos por año. Para un creciente número de empresas químicas en Estados Unidos, Europa, la ex URSS y Asia estas sustancias eran una gran fuente de ingresos. Para otras muchas compañías eran un elemento necesario en sus procesos de producción.

Cuadro 5-1 USOS, TASAS DE PRODUCCIÓN Y TIEMPOS DE PERMANENCIA DE LOS PRINCIPALES AGENTES QUÍMICOS DAÑINOS PARA EL OZONO

Nombre compuesto	Fórmula química	Potencial de agresión al ozono	Usos	1985 Producción mundial (Ton.)	Tiempo de permanencia la atmósfera (años)
CFC-011	$CFCL_3$	1,0	Refrigeración, aerosol, espuma	298.000	65-75
CFC-012	CF_2CL_2	0,9-1,0	Refrigeración, aerosol, espuma, congelación de alimentos, detector de calor, sistemas de alarma, cosméticos, contenedores presurizados	438.000	100-140
CFC-113	CCL_3CF_3	0,8-0,9	Solventes, cosméticos	138.500	100-134
CFC-114	$CCLF_2CCLF_2$	0,7-1,0	Refrigeración		300
CFC-115	$CCLF_2CF_3$	0,4-0,6	Refrigeración, estabilizante		500
Halón 1301	$CBrF_3$	10,0-13,2	Ignífugo	2.600	110
Halón 1211	$CCBrF_2$	2,2-3,0	Ignífugo	2.600	15
HCFC-22	$CUCLF_2$	0,05	Refrigeración, aerosol, espuma, ignífugo	81.200	16-20
Metil cloroformo	CH_3CCL_3	0,15	Solventes	499.500	5,5-10
Tetraclorato de carbono	CCL_4	1,2	Solventes	71.200	50-69

Ilustración 5-1 PRODUCCIÓN MUNDIAL REGISTRADA DE CFC-011 Y CFC-012

Miles de toneladas por año



La producción de los dos CFC más difundidos creció con rapidez hasta 1974, cuando se presentaron las primeras ponencias postulando su carácter nocivo sobre la capa de ozono. La reducción subsiguiente se debió al activismo en defensa del medio ambiente contra los aerosoles que contienen CFC, que fueron finalmente prohibidos en EE UU en 1978. Después de 1982 la expansión de otros usos de los CFC llevó a un nuevo incremento de su producción total. (Fuente: *Chemical Manufacturers Association*).

El límite

A gran altura en la estratosfera, al doble de altitud del monte Everest, o a la altura a la que vuelan los aviones de reacción, hay un velo delicado que cumple una función crucial. Está hecho de un gas llamado ozono: tres átomos de oxígeno unidos (O_3) por oposición al oxígeno habitual de la atmósfera, que consta de dos átomos de oxígeno unidos (O_2). El ozono es inestable; es tan reactivo que ataca y oxida casi cualquier cosa con la que entra en contacto. Por lo tanto, en la atmósfera baja, que está recargada de materiales con los que puede reaccionar, incluidos los tejidos de las plantas y pulmones humanos, el ozono es un elemento contaminante destructivo pero de ciclo de existencia muy corto. Sin embargo, en la estratosfera, hay escasos productos con los cuales el ozono puede combinarse. El

ozono se crea constantemente en esa capa por la acción de la energía solar sobre las moléculas de oxígeno, y dura un tiempo relativamente prolongado. Éste es el motivo por el cual se acumula una "capa de ozono".

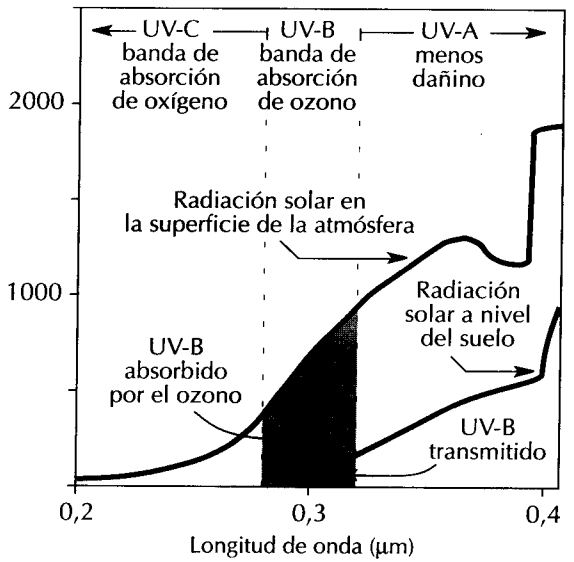
Dicha capa es rica en ozono sólo por comparación con la escasez de ese gas en cualquier otra parte de la atmósfera. Sólo una molécula de cada 100.000 es ozono en dicha capa. Pero hay suficiente ozono en la estratosfera como para absorber de la luz solar que entra en la atmósfera virtualmente todos los rayos ultravioletas especialmente nocivos cuya frecuencia de onda fue denominada UV-B (ver ilustración 5-2). Los rayos UV-B son un flujo de pequeños paquetes de energía que tienen la frecuencia adecuada para desprender moléculas orgánicas —el tipo de moléculas que conforman a todos los seres vivientes, incluidas las moléculas de DNA que contienen el código de la reproducción genética.

Cuando los organismos vivos reciben el impacto de los rayos UV-B, uno de los resultados posibles es el cáncer. Hace tiempo que se sabe que la emisión de rayos UV-B es cancerígena para la piel por experiencias en animales de laboratorio. Casi todos los cánceres de piel humanos se producen en partes de la piel expuestas a la radiación solar. Se producen especialmente en personas de piel clara que pasan mucho tiempo al sol. Australia tiene la mayor tasa de cáncer de piel del mundo: con las actuales tasas de incidencia, dos de cada tres australianos desarrollarán algún tipo de cáncer de piel durante su vida, y uno de cada 60 desarrollará el tipo con mayor índice de mortalidad, el melanoma maligno. Los científicos estiman que, por cada descenso del 1% en la capa de ozono, habrá un incremento del 2% en las radiaciones de UV-B sobre la superficie de la tierra, y un incremento de entre el 3% y el 6% en la incidencia del cáncer de piel humano[88].

La radiación UV-B coloca a la piel humana bajo una doble amenaza. Puede inducir el desarrollo del cáncer y puede suprimir la capacidad del sistema inmunológico para combatir el cáncer. Esta supresión del sistema inmunológico hace a la gente más susceptible a los herpes y otras enfermedades infecciosas.

Además de la piel, la otra parte del cuerpo más expuesta a las radiaciones UV-B es la vista. La luz ultravioleta puede quemar la córnea, causando una afección conocida como "ceguera de la nieve", porque a menudo afecta a los esquiadores y montañistas a grandes altitudes. La ceguera ocasional de la nieve es muy dolorosa; la repetición de la ceguera de la nieve puede reducir la visión en forma permanente. Las emisiones UV-B también pueden ocasionar daños en la retina y generar cataratas en el cristalino.

Ilustración 5-2 ABSORCIÓN DE LA LUZ ULTRAVIOLETA POR LA ATMÓSFERA



La luz ultravioleta procedente del sol es casi totalmente absorbida por el oxígeno y el ozono en la atmósfera. (Fuente: *Programa para el Medio Ambiente de Naciones Unidas*)

Si el agotamiento del ozono permite que una mayor cantidad de radiación UV-B alcance la superficie de la tierra, cualquier ser viviente con piel y ojos expuestos al sol podría sufrir efectos similares a los que padecen los seres humanos. Estudios detallados de los efectos de la radiación UV-B sobre otros animales y plantas apenas si están empezando a realizarse, pero algunos de sus resultados son ya claros:

- Los organismos unicelulares o muy pequeños pueden resultar más dañados que los seres vivientes más grandes porque la radiación UV-B sólo puede penetrar pocas capas celulares.

- Los rayos UV-B penetran sólo en los primeros metros del agua oceánica, pero ésta es la capa en la que vive la mayor parte de los microorganismos acuáticos. Estos pequeños animales o plantas acuáticas flotantes son especialmente sensibles a los UV-B. Son además la base de la mayoría de las cadenas alimentarias oceánicas. Por lo tanto, un incremento en las radiaciones UV-B podría perturbar grandemente a muchas poblaciones de vida oceánica.

- La exposición a las radiaciones UV-B reduce el área de follaje, la altura de las plantas, y la fotosíntesis en las plantas verdes. Diferentes cultivos responden a la radiación UV-B en grado distinto, pero en dos tercios de las plantaciones de cosecha estudiadas, los rendimientos son inversamente proporcionales a las mencionadas radiaciones. Por ejemplo, los estudios de la radiación de UV-B sobre la soja llegaron a la conclusión de que cada caída del 1% en la densidad de la capa de ozono ocasionaba una caída del 1% en el rendimiento de la cosecha de soja[86].

- Las plantas de cultivo parecen más sensibles a la radiación UV-B que las hierbas silvestres.

Las criaturas vivientes han evolucionado de muchas formas para protegerse de la luz ultravioleta, tales como la pigmentación, la cobertura del pelo o las escamas, mecanismos de reparación del ADN dañado, y conductas de comportamiento que mantienen a las criaturas más sensibles escondidas de la luz solar intensa. Estos sistemas funcionan mejor para algunas especies que para otras. Por lo tanto, uno de los efectos de una capa de ozono degradada sería una reducción de la población o extinción en algunas especies e incrementos de población en otras. Los animales de pastoreo podrían superar en número a sus posibilidades de alimentación, las plagas a sus predadores, los parásitos a sus huéspedes. Cada ecosistema sentiría el efecto de una capa de ozono disminuida en formas que son imposibles de predecir, especialmente si otros cambios, como las modificaciones en el clima, se desarrollan al mismo tiempo.

Las primeras señales

En 1974 dos ponencias científicas publicadas por separado sugerían la existencia de una amenaza para la capa de ozono. Una de ellas afirmaba que los átomos de cloro en la estratosfera podían ser poderosos destructores del ozono[87]. La otra afirmaba que los CFC estaban alcanzando la estratosfera y rompiéndola, liberando átomos de cloro[88]. Tomadas en conjunto, estas

publicaciones predecían que la utilización humana de los CFC podría desatar un desastre medioambiental hasta entonces insospechado.

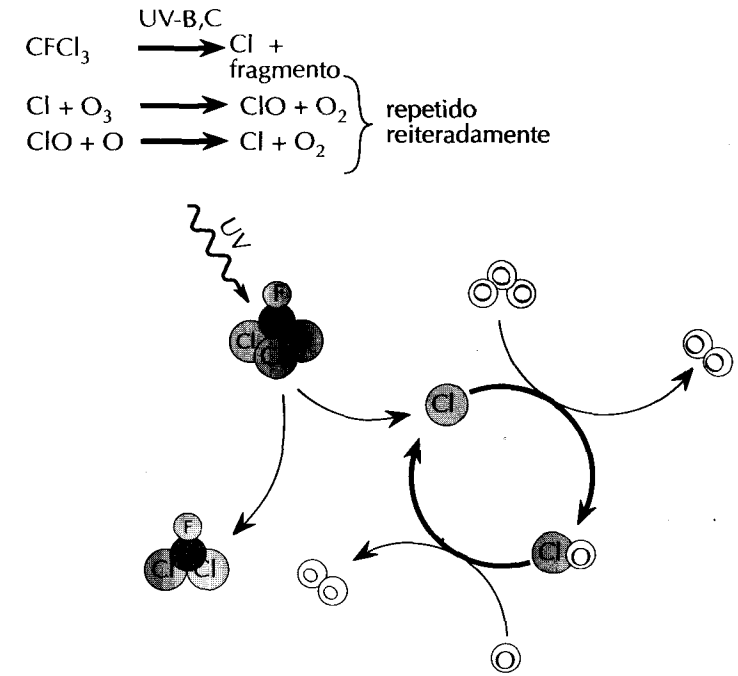
Debido a que no son reactivos y son insolubles, los CFC no se disuelven en la lluvia o reaccionan con otros gases. Su estructura de cloro-carbono o carbono-flúor es tan estable que la longitud de onda de la luz solar que alcanza a la atmósfera baja no es capaz de romper las uniones electroquímicas. Una de las pocas formas en que una molécula de CFC puede ser eliminada del aire es que ascienda hasta la última capa atmosférica, adonde llegan las radiaciones de onda corta de la luz ultravioleta que nunca alcanza la superficie de la tierra porque la filtran el ozono y el oxígeno. Esa radiación rompe eventualmente las uniones del gas CFC, liberando de esa molécula átomos de cloro.

Y allí es donde comienzan los problemas. El cloro libre (Cl) puede reaccionar con el ozono para constituir óxido de cloro (ClO). Luego, el ClO reacciona con un átomo de oxígeno para formar O_2 y Cl nuevamente. El átomo de Cl puede transformar a otra molécula de ozono en oxígeno y regenerarse nuevamente como cloro libre gaseoso (ilustración 5-3).

Un átomo de Cl puede hacer el ciclo de estas reacciones una y otra vez, destruyendo una molécula de ozono tras otra. El cloro actúa como un *comecocos* de la alta atmósfera, engullendo una molécula de ozono tras otra para regenerarse luego y volver a actuar. El átomo de cloro puede destruir un promedio de unas 100.000 moléculas de ozono hasta que finalmente desaparece de la estratosfera. En su proceso normal de desaparición, el cloro se combina con el metano para producir ácido hidroclórico (HCl). En ese punto pueden ocurrir dos cosas: o el HCl se rompe, liberando nuevamente Cl, continuando el ciclo de la destrucción del ozono; o el HCl puede caer sobre la atmósfera baja, donde se disuelve en el agua y regresa a la tierra en forma de lluvia ácida.

La regeneración continua del cloro es sólo una de las características insidiosas del proceso de destrucción del ozono. Otra es el gran retraso entre la síntesis humana de una molécula de CFC y su llegada a la estratosfera. Para algunos usos (como los propulsores de aerosoles) la descarga en el aire sigue de cerca a la producción. En otros usos (tales como los refrigerantes y espumas aislantes) el CFC puede ser liberado años o décadas después de su producción. Tras su liberación sobre la superficie de la tierra son necesarios en torno a 15 años para que una molécula de CFC logre abrirse camino hasta la estratosfera alta, donde se rompe y reacciona con el ozono. De tal forma que el adelgazamiento de la capa de ozono medido en cualquier momento es el resultado de la acción de las moléculas de CFC producidas y liberadas hace 15 años o más.

Ilustración 5-3 CÓMO LOS CFC DESTRUYEN EL OZONO ESTRATOSFÉRICO



Las moléculas de CFC en la superficie superior de la estratosfera son rotas por la luz ultravioleta liberando átomos de cloro (Cl). Estos átomos de cloro gaseoso reaccionan con el ozono (O_3) para producir monóxido de cloro (ClO). El ClO puede reaccionar entonces con un átomo de oxígeno para liberar nuevamente Cl, que puede reaccionar con otra molécula de ozono, y así sucesivamente.

La primera respuesta

Los dos trabajos de 1974 en los que se predecía la erosión de la capa de ozono despertaron una explosión de investigaciones sobre la química del cloro atmosférico en todo el mundo. En EE UU la información científica también se abrió paso con rapidez dentro del proceso político. Eso ocurrió en parte porque los autores del primer trabajo de investigación eran estadounidenses, preocupados por sus hallazgos, y decididos a difundirlos entre la opinión pública (especialmente F. Sherwood Rowland, quien rápidamente presentó el tema ante la Academia Nacional de Ciencias y ante el Congreso de EE UU). Otro factor que creó debates políticos rápidamente en EE UU fue el importante y bien organizado movimiento en defensa del medio ambiente.

Cuando los defensores estadounidenses del medio ambiente comprendieron las consecuencias de la conexión CFC-Ozono, entraron en acción. Comenzaron por condenar la utilización de los aerosoles. Es una locura, afirman, amenazar la vida sobre la tierra simplemente por el privilegio de usar un desodorante en aerosol. Su elección de los recipientes de aerosoles como único objetivo fue excesivamente simple, ya que también estaban en uso aerosoles que no contenían CFC, y había muchos usos industriales de los CFC. Pero para mantener las cosas en términos simples se acusó a los aerosoles, y los consumidores respondieron. Las ventas de envases de aerosoles cayeron en más de un 60%. Crecieron además las presiones políticas para una ley que prohibiera los envases de aerosoles que contuvieran CFC.

Se registró, como era de suponer, una fuerte resistencia de la industria a esta posibilidad. Un ejecutivo de Du Pont afirmó ante el Congreso en 1974: "La hipótesis del Cloro-Ozono es por el momento meramente especulativa sin evidencia concreta que la apoye". Pero añadió: "Si datos científicos acreditados... muestran que no se puede utilizar cualquier fluorocarbono sin atentar contra la salud, Du Pont dejará de producir estos compuestos"[89]. Catorce años más tarde, Du Pont, el mayor productor del mundo de CFC, cumplió con esa promesa.

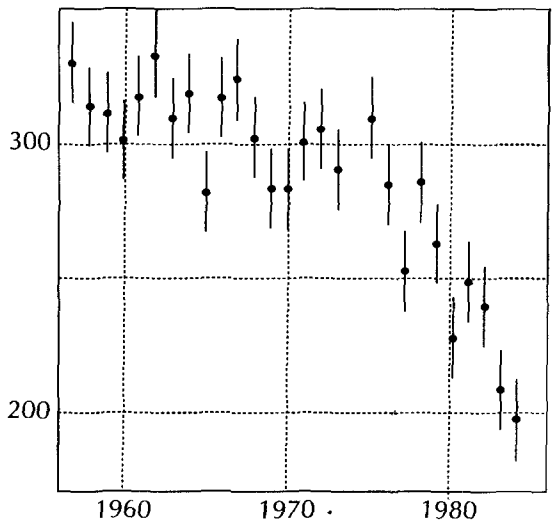
Una ley que prohibía el uso de los CFC como propulsores de aerosoles fue aprobada en Estados Unidos en 1978. Junto con la acción de los consumidores, que ya había reducido la venta de aerosoles, esa prohibición produjo una caída del 25% en la producción mundial de CFC. En la mayor parte del resto del mundo, sin embargo, los aerosoles seguían conteniendo CFC, y otros usos de los CFC, especialmente en la industria electrónica, hicieron que la producción continuara subiendo. A mediados de la década de 1980 el uso mundial de los CFC había regresado a su máximo histórico de 1975 (ilustración 5-1).

Erosión: el agujero de ozono

En octubre de 1984 los científicos del British Antarctic Survey midieron una caída del 40% en el ozono de la estratosfera por encima de su zona de investigación, Bahía Halley (Antártida). Sus mediciones de ozono habían caído en forma sistemática a lo largo de una década (ilustración 5-4). Pero los científicos se habían mostrado reticentes a creer lo que veían. Una reducción del 40% parecía imposible. Los modelos de ordenador basados en el conocimiento de la química de la atmósfera predecían en ese momento sólo una baja caída porcentual de ozono, en el peor de los casos.

Ilustración 5-4 MEDICIÓN DEL OZONO EN BAHÍA HALLEY, ANTÁRTIDA

Concentración total de ozono (unidades Dobson)



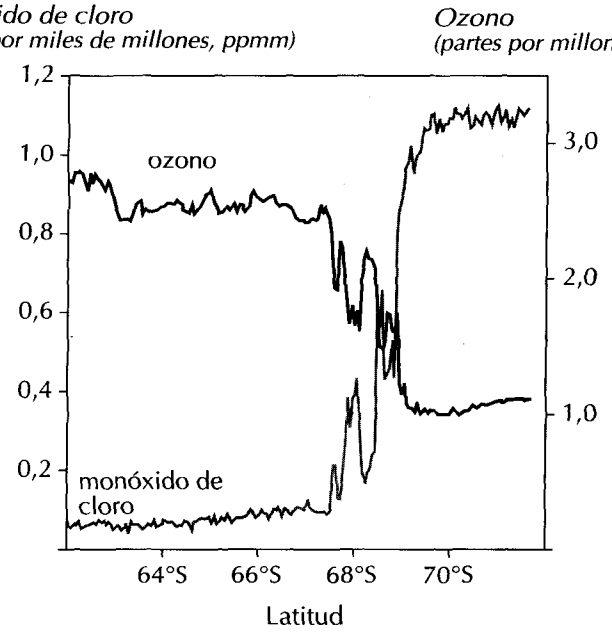
Las concentraciones de ozono en la atmósfera por encima de Bahía Halley, Antártida, durante el mes de octubre, tomadas cuando el sol regresaba en cada primavera al hemisferio sur, habían declinado en forma sistemática durante más de una década antes de que en 1985 se publicara la ponencia en la que se establece el agujero de ozono. (Fuente: *J. C. Farman et al.*).

Los científicos británicos volvieron a revisar sus instrumentos. Buscaron lecturas similares de otros puntos de la tierra que confirmaran sus mediciones. Finalmente encontraron una. Una segunda estación de medición a 1.600 kilómetros de distancia al noroeste informó sobre una enorme reducción del ozono en la estratosfera.

En mayo de 1985 la histórica ponencia que anunciaba el agujero de ozono en "el hemisferio Sur" fue publicada[90]. La noticia comenzó a reverberar alrededor del mundo científico. Científicos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de EE UU se apiñaron para comprobar las lecturas del ozono atmosférico que había hecho el satélite Nimbus 7, mediciones que se habían tomado como rutina desde 1978. El Nimbus 7 jamás había indicado la presencia de un agujero de ozono.

En un nuevo control, los científicos de la NASA descubrieron que sus ordenadores habían sido programados para rechazar lecturas de ozono muy

Ilustración 5-5 A MEDIDA QUE AUMENTA EL CLORO REACTIVO, EL OZONO ANTÁRTICO DECRECE



Los instrumentos a bordo del avión de investigación de la NASA ER-2 midieron las concentraciones de monóxido de cloro y ozono en forma simultánea a medida que el avión volaba desde Punta Arenas, Chile (53°S), hasta los 72°S. Los datos reflejados arriba fueron recogidos el 16 de septiembre de 1987. A medida que el avión entraba en el agujero de ozono, la concentración de monóxido de cloro aumentó unas 500 veces por encima de los niveles normales, mientras la concentración de ozono caía en picado. (Fuente: *J. G. Anderson et al.*).

bajas sobre el supuesto de que esas bajas lecturas deben indicar errores de instrumentación[91]. Afortunadamente, los datos rechazados por el ordenador eran recuperables. Confirmaron las observaciones de Bahía Halley. Mostraban que los niveles de ozono habían estado cayendo sobre el Polo Sur durante al menos una década. Más aún, ofrecían un mapa detallado del agujero en la capa de ozono. Era enorme, del tamaño de EE UU continental, y se había ido agrandando y haciéndose más profundo cada año.

¿Por qué un agujero? ¿Por qué sobre la Antártida? ¿Qué podía suponer este hallazgo desde el punto de vista de la protección de la tierra de las radiaciones UV-B? El trabajo de los científicos durante los siguientes años para aclarar estos misterios fue extraordinario. Una de las pruebas más

espectaculares de que el cloro era indudablemente el culpable que ocasionaba el agujero de ozono se obtuvo en septiembre de 1987, cuando los científicos viajaron en un avión desde América del Sur directamente hacia el Polo Sur y hacia dentro del agujero de ozono. Sus mediciones de ozono y de ClO a medida que avanzaba el avión se muestran en la ilustración 5-5. Las alzas y las bajas en el ozono son prácticamente la imagen especular de las alzas y bajas en la concentración del ClO[92]. Más aún, las concentraciones de ClO medidas en el "agujero" son cientos de veces mayores que cualquier nivel que pudiera ser explicado por la química normal de la atmósfera. A esta cifra se la suele denominar el "arma humeante" que demostró incluso a los fabricantes de los CFC que el agujero del ozono no es un fenómeno normal. Es el signo de una atmósfera altamente perturbada por la producción humana de contaminantes que contienen cloro.

Los científicos tardaron varios años en elaborar una explicación sobre el agujero. En forma resumida, es la que sigue:

Dado que la Antártida está rodeada de océanos, los vientos pueden rodear el continente sin verse interrumpidos por masas de tierra firme. En el invierno austral, crean un vértice circumpolar, un remolino de vientos en torno al continente que atrapa el aire sobre la Antártida y le impide que se mezcle con el resto de la atmósfera. El vértice determina una cuba de reacción aislada para los agentes químicos en la atmósfera polar. (No hay un vértice tan poderoso sobre el Polo Norte, con lo cual el agujero de ozono en el Norte es mucho menos pronunciado).

En invierno la atmósfera antártica es el lugar más frío de la tierra (menos de 90°C bajo cero). En ese frío extremo el vapor de agua se mantiene flotando como una niebla de diminutos cristales de hielo a gran altura donde se encuentra la capa de ozono. La superficie de estos cristales de hielo diminutos acelera la reacción química que libera el cloro destructor del ozono.

Los átomos de cloro formados en la oscuridad del invierno antártico no entran de inmediato en la reacción en cadena de la destrucción del ozono. En lugar de ello reaccionan una sola vez con el ozono para formar ClO. Las moléculas de ClO se unen entre sí para formar un dímero relativamente estable de ClOOCl. El proceso genera una acumulación de ClOOCl, que queda aparcado a la espera del regreso del sol[93].

Cuando regresa la luz solar en la primavera antártica, las radiaciones solares rompen el dímero ClOOCl liberando una gran bocanada de Cl, que inicia su trabajo sobre el ozono. La concentración de ozono cae precipitadamente en escasas semanas. A algunas altitudes, más del 97% del ozono desaparece.

La luz solar gradualmente disipa el vórtice circumpolar, permitiendo que el aire del Polo Sur se mezcle de nuevo. El aire desozonizado se dispersa sobre el resto del globo, mientras los niveles de ozono sobre la Antártida regresan a niveles prácticamente normales.

Agujeros menores han sido observados sobre el Polo Norte en la primavera boreal. No se espera encontrar agujeros discretos en otras partes del planeta. Pero a medida que los gases del planeta se mezclan, la concentración de ozono en la estratosfera sobre toda la tierra decrece de forma mensurable. Debido al gran retraso que tienen los CFC en alcanzar la estratosfera, es inevitable que haya una mayor destrucción de ozono. Debido a la prolongada vida media de los CFC y del Cl en la atmósfera, el proceso durará al menos un siglo, aun en el caso de que se suspendieran de inmediato todas las liberaciones de CFC a la atmósfera.

La siguiente respuesta

No hay acuerdo completo, entre la gente que participó en las negociaciones globales, sobre si el anuncio del agujero de ozono en 1985 supuso para los políticos un impulso tan grande como para los científicos. Ya se habían iniciado las negociaciones para limitar la producción de CFC, pero habían hecho pocos avances. Una reunión en Viena, realizada dos meses antes de que se publicara el anuncio del agujero de ozono, suscribió una declaración de buenas intenciones según la cual las naciones deberían "tomar las medidas apropiadas" para proteger la capa de ozono, pero no establecía una cronología ni estipulaba sanciones. La industria había abandonado la búsqueda de sustitutos de los CFC, dado que no parecían necesarios a corto plazo[94]. El agujero de ozono de la Antártida no se había vinculado todavía en forma definitiva a los CFC; eso ocurrió exactamente tres años más tarde.

Algo ocurrió, sin embargo, entre marzo de 1985 en Viena, cuando no se tomó ninguna medida de acción, y octubre de 1987 en Montreal, cuando se firmó el primer protocolo internacional de protección del ozono. El agujero sobre la Antártida tuvo un efecto psicológico, quizá fundamentalmente porque no era un proceso comprendido. No cabía ninguna duda de que la capa de ozono estaba haciendo cosas raras. Pese a que aún no había pruebas concretas, los CFC eran los culpables más probables.

Con o sin pruebas, probablemente nada hubiera ocurrido si no hubiese sido por el Programa de Medio Ambiente de Naciones Unidas (UNEP).

UNEP fue anfitrión y promotor del proceso político internacional. Sus funcionarios se reunieron para interpretar la evidencia científica disponible y presentarla a los gobiernos, crearon un ambiente neutral para el debate de alto nivel, y actuaron como mediadores. El director de la UNEP, Mustafa Tolba, demostró ser un hábil diplomático del medio ambiente, manteniéndose neutral en las diversas escaramuzas que se sucedieron, recordando pacientemente a todos los implicados que ninguna consideración de corto plazo o egoísta era más importante que la integridad de la capa de ozono.

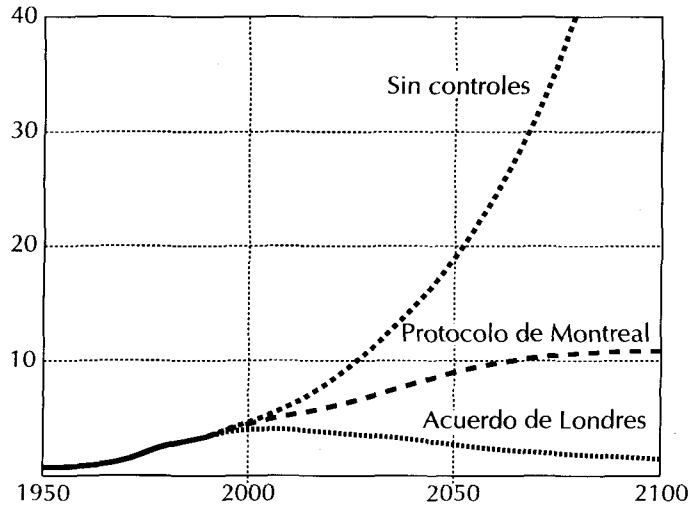
El proceso de negociación no fue sencillo[95]. Las naciones del mundo no se habían enfrentado nunca a una amenaza global al medio ambiente antes de que se la comprendiera en forma completa y antes de que hubiera producido un daño mensurable a la salud o a la economía humanas. Las principales naciones productoras de CFC jugaron un papel fácil de predecir en su intento de frenar cualquier reducción drástica en el uso de los CFC.

Las decisiones críticas penden a veces de delicados hilos políticos. Estados Unidos, por ejemplo, jugó un importante papel de líder, y en más de una ocasión soportó intentos internos de recorte por las grandes divisiones dentro del Gobierno Reagan. Esas divisiones se hicieron públicas cuando el Secretario de Interior, Donald Hodel, fue citado diciendo que la capa de ozono no sería problema alguno si la gente usara sombreros de ala ancha y gafas de sol cuando saliera a la calle. El ridículo internacional que se orquestó en torno a sus declaraciones ayudó a los miembros de la administración estadounidense que estaban intentando que el presidente se tomara en serio el problema del ozono.

La UNEP mantuvo su presión. Los grupos de defensa del medio ambiente de Europa y Estados Unidos prosiguieron el pulso con sus gobiernos. Los científicos desarrollaron talleres para informar a periodistas, parlamentarios y público. Respondiendo a las presiones de todas partes, los gobiernos nacionales finalmente —y con rapidez sorprendente— firmaron en Montreal en 1987 un Protocolo de Sustancias que Destruyen la Capa de Ozono. El "Protocolo de Montreal" estipulaba en primer lugar que la producción mundial de los cinco CFC más habituales se congelara a los niveles de 1986. Luego, la producción debería reducirse en un 20% en 1993, y finalmente otro 30% en 1998. Este acuerdo de "congelamiento-20-30" fue firmado por 36 países, incluidos todos los grandes productores de CFC.

Ilustración 5-6 CRECIMIENTO REAL Y PROYECTADO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CLORO ESTRATOSFÉRICO INORGÁNICO POR LAS EMISIONES DE CFC

Concentración de cloro estratosférico en partes por mil millones (ppmm)



Mantener el nivel de producción de 1986 de CFC hubiera incrementado la concentración de cloro atmosférico más de 60 veces entre 1950 y el 2100. El Protocolo de Montreal definió menores tasas de emisión, pero de todas formas hubiera permitido que los niveles de cloro prácticamente se duplicaran respecto a sus niveles de 1980. El Acuerdo de Londres elimina el uso de los CFC; conducirá a niveles decrecientes de cloro a partir del año 2005. (Fuentes: *J. Hoffman et al.*; *R. E. Benedick*).

El Protocolo de Montreal fue un acuerdo histórico. Fue mucho más allá de lo que los defensores del medio ambiente de entonces consideraban como políticamente posible. Y poco después se hizo evidente que las reducciones de CFC acordadas se habían quedado cortas. La ilustración 5-6 muestra lo que hubiera ocurrido con la concentración del Cl destructor de ozono en la atmósfera, si las emisiones se hubieran mantenido al nivel de 1986 y si se hubieran recortado según el Protocolo de Montreal. A causa de los grandes *stocks* de CFC que se han producido a lo largo de los años pero que siguen sin liberar, y que han sido liberados pero no han alcanzado aún la estratosfera, el Cl hubiera seguido aumentando en cualquier caso. Aun con el Protocolo, el cloro estratosférico eventualmente duplicaría su actual nivel de concentración.

Las razones de la debilidad del acuerdo eran comprensibles. La mayor parte de las naciones del Tercer Mundo no lo firmaron. China, por ejemplo, estaba intentando equipar la mayor parte de las viviendas del país con sus primeros frigoríficos, lo que suponía una gigantesca demanda de freón. La URSS se escurrió, argumentando que su sistema de planificación quinquenal no le permitía un cambio rápido en la producción de CFC. Solicitó y logró un plan de reducción escalonada. Por otra parte, la mayoría de los productores industriales de CFC esperaban mantener al menos una parte de su mercado.

Un año después de la firma del Protocolo de Montreal, sin embargo, se registraron mayores índices de eliminación de ozono, y se publicó la evidencia del "arma humeante". En ese punto Du Pont anunció que eliminaría por completo su producción de CFC. En 1989 Estados Unidos y las naciones de la CE decidieron que suspenderían toda la producción de los cinco CFC más comunes para el año 2000. Efectuaron un llamamiento a todas las naciones del mundo para que se respetaran las estipulaciones del Protocolo de Montreal, requiriendo un control periódico de la situación del ozono y, en caso de ser necesario, medidas más firmes.

Tras nuevas negociaciones, una vez más encabezadas por la UNEP, gobiernos de 92 países se reunieron en Londres en 1990 y acordaron eliminar por completo la producción de CFC para el año 2000. Añadieron a la lista de productos a eliminar el metil cloroformo, el tetracloruro de carbono, y los halones, que son también productos que destruyen el ozono. Varias naciones del Tercer Mundo se negaron a firmar a menos que se estableciera un fondo internacional destinado a financiar el cambio tecnológico a las alternativas de los CFC. Cuando Estados Unidos se negó a contribuir a dicho fondo, el acuerdo estuvo al borde del fracaso, pero finalmente se estableció el fondo. La reducción en el Cl estratosférico que se espera del Acuerdo de Londres se muestra en la ilustración 5-6.

Viviendo sin los CFC

Mientras la diplomacia seguía, se estaba desarrollando un estallido de creatividad industrial con cientos de formas de reducir la emisión de los CFC en existencia y de encontrar sustitutos adecuados.

Debido a la prohibición de 1978 en Estados Unidos, los fabricantes ya habían descubierto propulsores alternativos para aerosoles, muchos de los cuales resultaron ser más baratos que los CFC. Tal como afirmó el

químico de la atmósfera Mario J. Molina: "En 1978, cuando Estados Unidos prohibió el uso de los CFC como propulsores en los envases de aerosoles... los expertos dijeron que la prohibición dejaría sin trabajo a mucha gente. No fue así. En cualquier caso, el mundo no puede hacer frente a las consecuencias de una permanente liberación de CFC hacia el medio ambiente"[96].

Los refrigerantes en frigoríficos y aire acondicionado solían ser liberados en el aire cuando esas unidades eran sometidas a mantenimiento o se descartaban. Ahora se han inventado equipos que recapturan, purifican y reutilizan esos refrigerantes. Ya se conocían algunos refrigerantes alternativos a los CFC (se los había utilizado antes de la síntesis de los CFC), y otros están en fase de desarrollo.

Las empresas de electrónica y aeronáutica han desarrollado solventes sustitutivos para limpiar los circuitos impresos y las partes de aviones, algunos de los cuales son simples soluciones acuosas. También han rectificado los procesos de producción para eliminar totalmente muchos procesos de lavado, con considerables ahorros económicos. Varias empresas de Estados Unidos y Japón han formado una coalición para compartir su investigación en esta adaptación con fabricantes de electrónica de todo el mundo, sin costes, para alentar la eliminación de los CFC como solventes[97].

Compañías químicas están comenzando a producir CFC hidrogenados (con sólo entre un 2% y un 10% de la capacidad destructiva de sus antecesores) y otros compuestos totalmente nuevos para sustituir en usos específicos a los CFC.

La espuma aislante plástica ahora se inyecta con otros gases; las hamburguesas son envueltas en papel o cartón; los consumidores están regresando a las tazas de café lavables en lugar de las descartables de plástico.

El mundo se las puede arreglar sin los CFC. La industria se está adaptando para una eliminación completa de estos importantes productos químicos con mucho menos gasto y trastornos económicos que lo que cualquiera hubiera supuesto cuando se iniciaron las negociaciones internacionales. Dado que los CFC son además gases con efecto invernadero varios miles de veces más poderosos que el dióxido de carbono, su eliminación no sólo reducirá la destrucción del ozono, también contribuirá a reducir el riesgo de un cambio global del clima.

Mientras tanto, siguen llegando noticias de la estratosfera. En la primavera de 1991 la NASA anunció que las nuevas mediciones de satélite

sobre el hemisferio Norte muestran que la destrucción del ozono avanza al doble de la velocidad prevista. Por primera vez, en 1991, los niveles deprimidos de ozono sobre zonas pobladas de América del Norte, Europa y Asia Central se extendieron hasta entrado el verano, cuando el daño de la radiación es más probable que afecte a las personas y a las cosechas. Durante los veranos de la década de 1980 los niveles de ozono cayeron un 3% en el hemisferio Norte y un 5% en el hemisferio Sur, tres veces más rápido que lo que habían caído durante la década de 1970[98]. Y, en el otoño de 1991, el agujero de ozono sobre el Polo Sur era más grande y más profundo que en toda su historia.

¿La moraleja de la historia?

Se pueden sacar varias posibles lecciones de la historia del ozono, dependiendo del temperamento de cada uno y de sus predilecciones políticas. Aquí están las que nosotros hemos extraído:

- La voluntad política puede ser apelada a escala internacional para mantener la actividad humana dentro de los límites de la tierra.

- No es necesario que los pueblos y las naciones se conviertan en santos perfectos para forjar una cooperación internacional efectiva sobre temas difíciles, ni son necesarios el conocimiento perfecto o las pruebas científicas para la acción.

- No es necesario un gobierno mundial para encarar los problemas globales, pero es necesaria la cooperación científica global, un sistema global de información y un foro internacional dentro del cual se puedan negociar acuerdos específicos.

- Científicos, técnicos, políticos, corporaciones y consumidores pueden reaccionar con rapidez cuando ven la necesidad de hacerlo —pero no de forma instantánea.

- Cuando el conocimiento es incompleto, los acuerdos sobre el medio ambiente necesitan ser escritos con flexibilidad y revisados regularmente. Es necesario un control permanente para obtener información actualizada del medio ambiente.

- Los principales actores en el acuerdo del ozono fueron y serán necesarios: un negociador internacional como la UNEP; algunos gobiernos nacionales deseosos de tomar el liderazgo político; corporaciones flexibles y responsables; científicos que pueden comunicar y se comunican con los responsables de la política; activistas del medio ambiente que ejercen presión; consumidores alerta deseosos de modificar su elección de los productos sobre la base de información acerca del medio ambiente; y expertos técnicos que puedan aportar adaptaciones que hagan posible, conveniente y rentable la vida aun cuando se la viva dentro de los límites.

Desde luego que también se pueden ver en la historia del ozono todos los ingredientes de la estructura de un sistema de *sobrepasamiento* y colapso: crecimiento exponencial, un límite erosionable del medio ambiente, una prolongada demora en la respuesta física y política. Desde los primeros documentos científicos publicados hasta la firma del Protocolo de Montreal pasaron trece años. Pasarán otros trece años hasta que el acuerdo de Montreal, reforzado en Londres, se lleve a cabo totalmente. La eliminación del cloro de la atmósfera llevará más de un siglo.

Ésta es una historia de *sobrepasamiento*. Todos esperan que no se convierta en una historia de colapso. Que lo sea o no, depende de cuán erosionable o reparable sea la capa de ozono, de que aparezcan nuevas sorpresas atmosféricas, y de si la humanidad ha actuado, y continuará actuando, a tiempo.

Cápitulo 6:

TECNOLOGÍA, MERCADOS Y *SOBREPASAMIENTO*

Los datos indican que hemos exagerado constantemente las contribuciones del genio tecnológico y subestimado las contribuciones de los recursos naturales... Necesitamos... algo que perdimos en nuestra prisa por rehacer el mundo: un sentido de los límites, y conciencia de la importancia de los recursos de la tierra.

STEWART UDALL[99]

El genero Homo — 900.000

La especie del *Homo sapiens* ha estado sobre la tierra durante 100.000 años. Los seres humanos se han organizado en civilizaciones durante los últimos 10.000 años. Han experimentado un rápido crecimiento de la población durante al menos 300 años. Durante esos pocos cientos de años, las espectaculares innovaciones técnicas e institucionales —desde la máquina de vapor hasta la democracia, desde los ordenadores hasta las sociedades anónimas— han permitido a la economía humana trascender aparentes límites físicos y de gestión y sostener el crecimiento. Especialmente en las últimas décadas, la avanzada industria cultural ha implantado dentro de la mente humana las expectativas del crecimiento incesante.

En consecuencia, la idea de que puede haber límites al crecimiento es para mucha gente imposible de imaginar. Los límites son políticamente inmencionables y económicamente impensables. La sociedad tiende a dejar a un lado la posibilidad de los límites, depositando un profunda fe en el poder de la tecnología y en la operatividad del libre mercado.

> Mediante la sucesiva sustitución de tecnologías... la producción real puede seguir creciendo en forma ilimitada, sin que el consumo acumulativo de cualquier fuente de un recurso particular exceda sus límites dados[100].

> Confiamos en que la naturaleza del mundo físico permita mejoras continuadas en los procesos económicos de la humanidad... indefinidamente. Desde luego, siempre hay nuevos problemas de origen local, escasez y contaminación... Pero la naturaleza de las condiciones físicas del mundo y la elasticidad de un sistema económico y social que funciona en forma óptima, nos permite sobreponernos a esos problemas, y las soluciones suelen dejarnos en mejores condiciones que si el problema jamás se hubiera planteado; ésa es la gran lección que debemos aprender de la historia humana[101].

La crítica más común al modelo World3 hace veinte años era que subestimaba el poder de la tecnología y que no representaba adecuadamente la elasticidad de adaptación del libre mercado. Sabíamos acerca de la tecnología y los mercados, desde luego. Dimos por supuesto en el World3 que los mercados funcionan para reasignar la inversión con perfección. Incorporamos al modelo mejoras tecnológicas, tales como el control de la natalidad, la sustitución de recursos, la Revolución Verde en la agricultura. Probamos en los ensayos del modelo posibles saltos tecnológicos. ¿Qué ocurriría si los materiales son reciclados en su casi totalidad? ¿Qué ocurriría si el rendimiento de la tierra se duplica, y se vuelve a duplicar? ¿Qué pasaría si los controles de contaminación se hacen 4 o 10 veces más eficaces?

Pero incluso asumiendo estos extremos, el modelo del mundo sobrepasa sus límites. Aun con las tecnologías más eficientes y la mayor elasticidad económica que podamos imaginar, si ésos son los únicos cambios, el modelo genera escenarios de colapso.

En este capítulo explicaremos por qué. De todas formas, antes de seguir adelante, queremos dejar constancia de que estamos en un territorio peligroso. Estamos hablando de procesos que no son sólo temas de estudio científico, sino también artículos de fe cultural. Cualquier calificación o duda que expresemos será oída por cierta gente como una herejía. Si sugerimos que la tecnología o los mercados tienen problemas o límites, habrá quien nos califique de antitecnología o antimercado.

No somos ni lo uno ni lo otro. Estamos técnicamente formados y somos entusiastas de la tecnología[102]. Contamos con las eficiencias técnicas para situar la economía humana, sin sacrificios, por debajo de los límites del planeta. También respetamos las virtudes del mercado. Dos de nosotros están doctorados en una importante escuela de administración de empresas; otro de nosotros ha sido presidente de una escuela de administración de empresas y en la actualidad es empresario. Contamos con la mejoría de las señales del mercado, así como de las de la tecnología, para crear una sociedad productiva, próspera y sostenible. Pero no contamos con los mercados y la tecnología por sí mismos, sin cambios, sin guía alguna de valores u objetivos, más allá de la dominación del mercado, como medios para alcanzar la materialización de una sociedad sostenible.

Nuestra fe cualificada en la tecnología y los mercados se basa en nuestra comprensión de los principios y el comportamiento del sistema. Proviene de la disciplina de tener que expresar en el modelo del mundo qué es exactamente la tecnología y qué hacen exactamente los mercados. Cuando uno debe modelar estos procesos concretamente, en lugar de hacer arrasadoras generalizaciones sobre ellos, uno descubre cuáles son sus funciones y poderes en el sistema mundial y también cuáles son sus limitaciones.

En este capítulo habremos de:

- Describir los procesos de retroalimentación del mercado y la tecnología, tal como los entendemos y los hemos modelado para el World3.
- Mostrar ensayos con el ordenador en los que se asume un nivel tecnológico creciente.
- Explicar por qué el sobrepasamiento, la inestabilidad y el colapso siguen siendo las modalidades dominantes de comportamiento en estos ensayos.
- Finalizar con el corto estudio de un caso sobre las pesquerías del mundo, que demuestra cómo las tecnologías y los mercados del mundo actual contribuyen en realidad al colapso de un valioso recurso.

Tecnología y mercados en el "mundo real"

¿Qué es "realmente" la tecnología? ¿La habilidad para resolver cualquier problema? ¿La fuente de todos los males? ¿La manifestación física del genio inventivo de la humanidad? ¿El incremento que se puede obtener de una hora de trabajo o de una unidad de capital? ¿El control de la naturaleza por la humanidad? ¿El control de cierta gente sobre otra gente sirviéndose de la naturaleza como instrumento?

Los modelos mentales de la gente contienen todos estos conceptos de la tecnología y algunos más[103].

¿Qué es realmente el mercado? Hay quien dirá que es simplemente el sitio donde compradores y vendedores se encuentran para establecer el precio de intercambio que expresa el valor relativo de cada bien. Otros dirán que el libre mercado es una ficción inventada por los economistas. Algunas personas a las que se ha privado de un mercado de trabajo piensan de él que es una institución mágica que de alguna manera nos hace llegar pantalones vaqueros y vídeos en abundancia. ¿O acaso es el mercado la capacidad de poseer capital en forma privada y adueñarse de los beneficios? ¿O quizá la forma más eficaz de asignar los productos de la sociedad? ¿O un mecanismo por el cual unas personas controlan a otras por medio del dinero? De entre esta confusión de modelos, la idea que la gente tiene más comúnmente cuando afirma que la tecnología y los mercados pueden contrarrestar los límites de crecimiento es de la siguiente guisa:

- Aparece un problema relacionado con los límites: un recurso se hace escaso, o un contaminante peligroso comienza a acumularse.

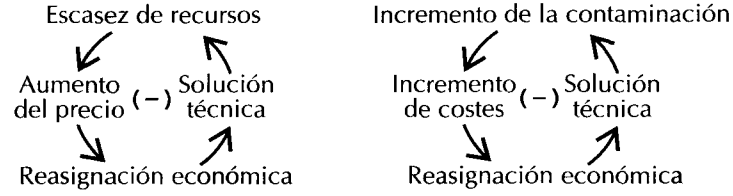
- El mercado fuerza hacia arriba el precio del recurso escaso con relación a otros, o el agente contaminante comienza a elevar costes que se reflejan en los precios de productos y servicios. (En este punto se acepta habitualmente que el mercado necesita un ajuste significativo para poder asumir los costes de la contaminación).

- El alza de los precios ocasiona respuestas. Paga la prospección de un mayor volumen de recursos. Obliga a los productores a sustituir el recurso escaso por otro más abundante. Obliga a los consumidores a usar menos productos que contienen dicho recurso o a usar dicho recurso en forma más eficiente. Induce a los ingenieros a desarrollar sistemas de control de la contaminación, o a encontrar sitios donde recluir el contaminante para mantenerlo lejos de la sociedad humana, o a inventar procesos de manufactura que no generan dicho agente contaminante.

- Estas respuestas del lado de la demanda y de la oferta compiten en el mercado, donde los compradores y vendedores colectivamente deciden qué tecnologías y qué modalidades de consumo resuelven el problema con mayor rapidez y con mayor eficacia a menor coste. La sociedad elige luego la mejor solución y se sobrepone a la escasez, o reduce el daño ocasionado por el agente contaminante.

Obsérvese que este modelo no descansa solamente en la tecnología o solamente en el mercado, sino en la interacción suave entre ambos. El mercado es necesario para señalar el problema, para dirigir los recursos hacia su solución, y para seleccionar y premiar la mejor solución. La tecnología es necesaria para resolver el problema. El paquete en su conjunto debe estar presente. Sin señales u orientación del mercado, la tecnología no despertará a la necesidad. Sin el conocimiento y el ingenio técnicos, las señales y orientación del mercado no producirían resultados.

Obsérvese que este modelo adopta la forma de un bucle de retroalimentación negativa: una cadena causal que actúa para invertir un proceso, corregir un problema, restablecer el equilibrio. Se supera la escasez del recurso. La contaminación se depura o se aísla. La sociedad puede seguir creciendo.



Creemos que existen ciclos de ajuste como éste y que son importantes. Los hemos incluido en muchos sitios en el modelo World3, pero no como una variable milagrosa, única y agregada llamada "tecnología". Las tecnologías surgen de muchas causas y tienen muchos efectos. La atención sanitaria, por ejemplo, es automática en World3. Se genera cada vez que el sector de servicios de la simulación del mundo lo puede pagar. La tecnología del control de la natalidad aparece en World3 cuando el sistema sanitario la puede sostener y cuando hay demanda para ella en la forma de deseo de una familia de escaso tamaño. El desarrollo de la tierra y la mejora de su rendimiento son también automáticos en World3, mientras la demanda de comida quede insatisfecha y haya capital disponible.

Si las fuentes no renovables se hacen escasas, la economía del World3 asigna más capital a su descubrimiento y explotación. Asumimos que la

base de recursos se puede explotar en forma total, pero a medida que los recursos se van agotando es necesario cada vez más capital para encontrarlos y extraerlos. También damos por supuesto que los recursos no renovables se pueden sustituir entre ellos, sin costes o retrasos. (Por lo tanto los agrupamos a todos juntos sin distinguir entre ellos).

Los ajustes de mercado-tecnología mencionados antes están incorporados al World3. Modificando las cifras en el modelo podemos reforzarlas o debilitarlas. Si no modificamos los números, estas tecnologías alcanzan en el mundo simulado aproximadamente los mismos niveles de producción industrial *per cápita* con que se manifiestan en los actuales países muy industrializados.

En World3 la necesidad de una tecnología incorporada —atención sanitaria, control de la natalidad, mejoras agrícolas, descubrimiento y sustitución de recursos— está señalizada perfectamente y sin demoras para el sector de capital. Esas tecnologías se desarrollan sin dilación mientras haya suficiente producción industrial o de servicios para hacerlas posibles. No representamos los precios en forma explícita, porque damos por sentado que los precios son señales de intermediación en un mecanismo de ajuste que funciona de manera instantánea y perfecta. Representamos el mecanismo sin el intermediario. Ese supuesto omite muchos retrasos e inexactitudes que se presentan en los sistemas de mercado "reales".

Hay otra serie de tecnologías en World3 que no se materializan como tales a menos que las incorporemos en escenarios de prueba. Incluyen la eficiencia de los recursos y el reciclado, el control de la contaminación, y el control de la erosión de la tierra. Hace veinte años no considerábamos estas tecnologías tan establecidas como para que estuvieran técnicamente probadas y dispuestas para ser embarcadas hacia cualquier lugar del mundo con la única condición de que se las pudiera pagar[104]. Por lo tanto, las programamos de forma tal que se las puede activar en cualquier simulación de tiempo futuro. Por ejemplo, podemos suponer que todo el mundo adopta un compromiso importante en 1995 para el reciclado, o un esfuerzo concertado contra la contaminación en el 2005. Estas tecnologías de "puesta en marcha" (*turn on* en el original), requieren capital, y sólo se presentan tras un retraso de desarrollo y realización que se cifra normalmente en veinte años, a menos que decidamos, como lo haremos más adelante en este capítulo, acortarlo.

La razón para tener un modelo de ordenador es ensayar diferentes supuestos y explorar diferentes futuros. Podemos, por ejemplo, observar el escenario 2, el último ensayo que presentamos en el capítulo 4, en el cual el crecimiento se detenía por una crisis de contaminación, y nos

podemos preguntar: ¿Qué ocurriría si ese mundo simulado respondiera a la curva ascendente de la contaminación haciendo una determinada inversión en la tecnología de control de la contaminación?

El escenario 3 muestra lo que ocurriría.

Extendiendo los límites con tecnología en World3

En el escenario 3, y en todos los ensayos de ordenador subsiguientes contenidos en este libro, continuamos suponiendo el "doble de recursos" (recursos para 200 años a la tasa de explotación de 1990) que en el escenario 2. Eso convierte al escenario 2 en la base de comparación para los cambios de política y de tecnologías que siguen. Los cambios se aplican uno cada vez —primero la tecnología de control de contaminación, luego la tecnología para el rendimiento de la tierra, y así sucesivamente— no porque pensemos que existen posibilidades "realistas" de que el mundo pruebe con una tecnología cada vez, sino porque pedagógicamente ésa es la única forma de hacer que las respuestas del modelo sean comprensibles. En nuestro propio trabajo con el modelo World3, aun si deseamos probar tres cambios simultáneos, los aplicamos por turno, para poder entender el efecto de cada uno por separado antes de intentar comprender la acción combinada, y muchas veces interactuante, que tendrían todos al mismo tiempo.

En el escenario 3 hemos supuesto que en el año simulado 1995, mucho antes de que el nivel total de contaminación se haya elevado lo suficiente como para causar daños mensurables a un nivel global, ya sea sobre las cosechas o sobre la salud, el mundo decide reducir la contaminación al nivel que prevalecía en 1975 y asigna en forma sistemática capital para ese objetivo. Elige como modelo de aproximación el de "final de la tubería", reduciendo la contaminación en el punto de emisión, en lugar de hacerlo en la fuente.

Damos por supuesto que son necesarios veinte años para desarrollar cualquier nueva tecnología de reducción de la contaminación e implantarla en todo el mundo. A medida que la tecnología entra en funcionamiento, reduce la cantidad de contaminación emitida con cada unidad de producto industrial a razón de un 3% anual (dependiendo de las necesidades), hasta que la contaminación se reduce al nivel relativamente bajo que existía en 1975. (Ese objetivo fue establecido de forma arbitraria; se puede probar cualquier objetivo en los ensayos del modelo).

En este escenario la contaminación continúa elevándose a pesar del programa de reducción, debido a los retrasos en su realización, y debido al continuado crecimiento subyacente de la producción agrícola e industrial. Pero la contaminación se mantiene mucho más baja que en el escenario 2. Nunca llega a la suficiente concentración como para afectar en forma significativa a la salud humana, pero reduce la fertilidad de la tierra después del año 2015. Los rendimientos no decaen, porque la reducción en la fertilidad de los suelos se compensa mediante el incremento de insumos agrícolas. (Ejemplos del "mundo real" de este fenómeno son el uso de la cal en el abono de suelos para compensar el efecto de la lluvia ácida, o la utilización de fertilizantes para sustituir la baja capacidad de generar nutrientes que tienen los suelos a causa del uso intensivo de los pesticidas).

Las tendencias que contrarrestan el incremento de los insumos agrícolas y la fertilidad declinante del suelo en el escenario 3 desembocan en un estancamiento de la producción de alimentos tras la simulación del año 2010. La población sigue creciendo, de forma tal que los alimentos por persona decaen. La producción industrial total alcanza un máximo y comienza a descender alrededor del año 2035, a causa de la cantidad de capital derivado hacia la agricultura, la explotación de recursos y la contaminación, lo que determina una escasez de capital para reponer la depreciación del parque industrial. Dado que la población sigue creciendo hasta el año 2050, la producción industrial *per cápita* cae, la economía declina y se establece un colapso.

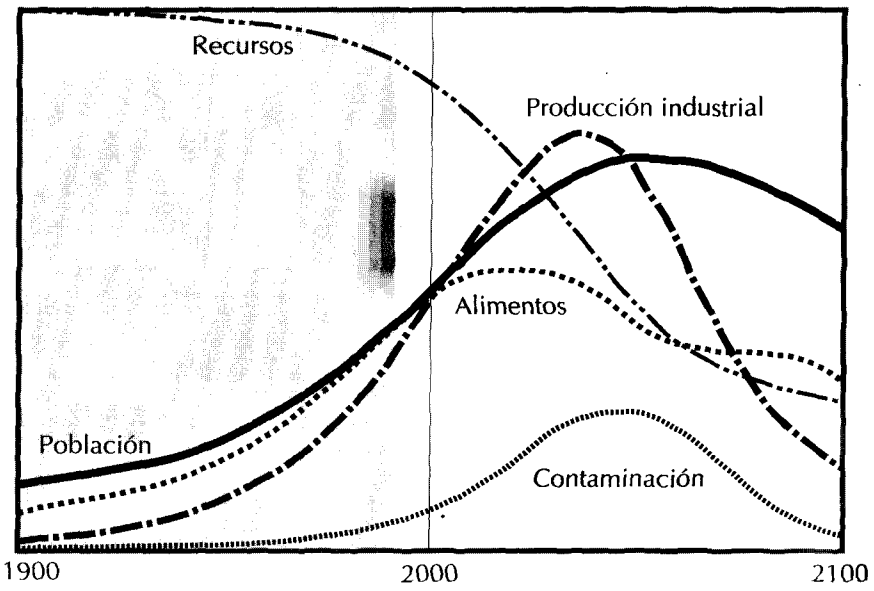
La sociedad del escenario 3 reduce sus niveles de contaminación de forma considerable, pero en ese proceso sufre una crisis de alimentación. ¿Qué ocurriría en caso de que derivara tecnología hacia el problema de la escasez de alimentos? Un resultado posible está descrito en el escenario 4.

Escenario 3 DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN

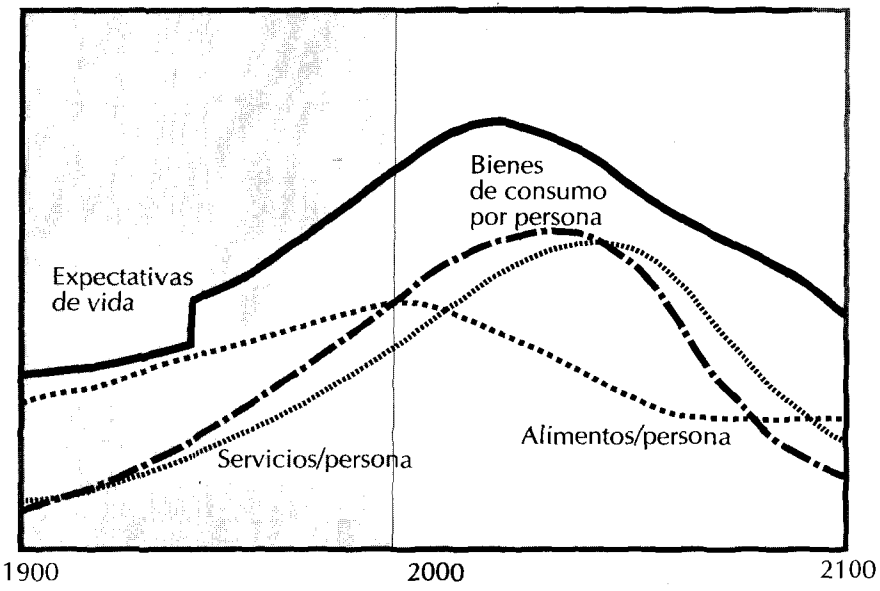
En este escenario asumimos que se han duplicado los recursos, como en el escenario 2, y que existe además una creciente tecnología de control de la contaminación, que puede reducir la cantidad de contaminación generada por unidad de producto industrial en un 3% anual. La contaminación, no obstante, se eleva lo suficiente como para producir una crisis en la agricultura que drena capital de la economía hacia la agricultura y eventualmente lleva al estancamiento al sector industrial.

ESCENARIO 3

Estado del mundo



Nivel material de vida



En el ensayo de este modelo se vuelve a activar el programa de reducción de la contaminación, y al mismo tiempo la sociedad mundial decide en 1995, anticipándose mucho a un problema mundial de alimentación, incrementar los rendimientos agrícolas más allá incluso de los rendimientos que la tecnología puede brindar. (Las tecnologías adicionales pueden ser, por ejemplo, tecnologías genéticas, añadidas a las extendidas tecnologías químicas difundidas en el siglo XX). También se da por supuesto que la implantación a escala mundial de las nuevas tecnologías agrícolas llevará veinte años, costará algo en términos de capital y permitirá incrementar el rendimiento en torno al 2% anual (una vez más dependiendo de las necesidades). Obsérvese que los incrementos anuales del 2% logrados durante un siglo supondrían incrementos totales del rendimiento del suelo equivalentes a un factor de más de 7, en el supuesto de que no hubiera retrasos en el desarrollo de tecnología.

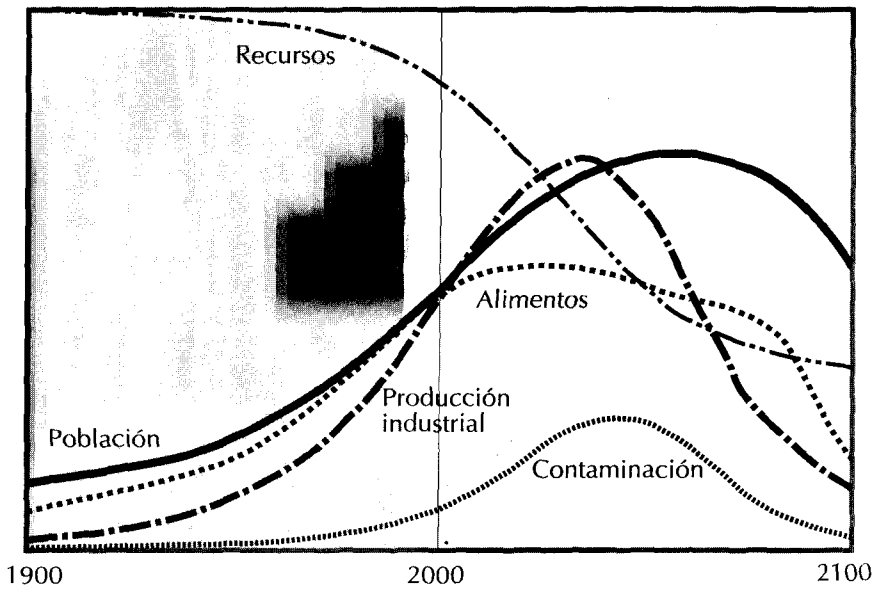
Esta nueva tecnología agrícola, combinada con la tecnología de reducción de la contaminación, mantiene en realidad el rendimiento de la tierra en rápido ascenso en el escenario 4, hasta que los promedios mundiales de rendimiento alcanzan casi cuatro veces los niveles de 1990 en torno al año 2100. No obstante, la producción de alimentos en su conjunto no se eleva mucho más, o durante mucho más tiempo, de lo que se elevó en el escenario anterior, porque los mayores rendimientos se obtienen cada vez de menos tierra. La altísima intensificación de la actividad agrícola en este mundo simulado provoca una erosión galopante del suelo. Con menos tierra, los productores trabajan para obtener incluso mayores rendimientos de la tierra que queda, lo que ocasiona incluso mayor erosión, y así sucesivamente, en un bucle de retroalimentación positiva que arrastra cuesta abajo al sistema de cultivo en forma acelerada. El sector agrícola, sometido a una sobrecarga, drena cada vez más capital y recursos humanos de la economía, en una época en la que la base de recursos no renovables, también en disminución, exige inversión.

Escenario 4 DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN E INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE LA TIERRA

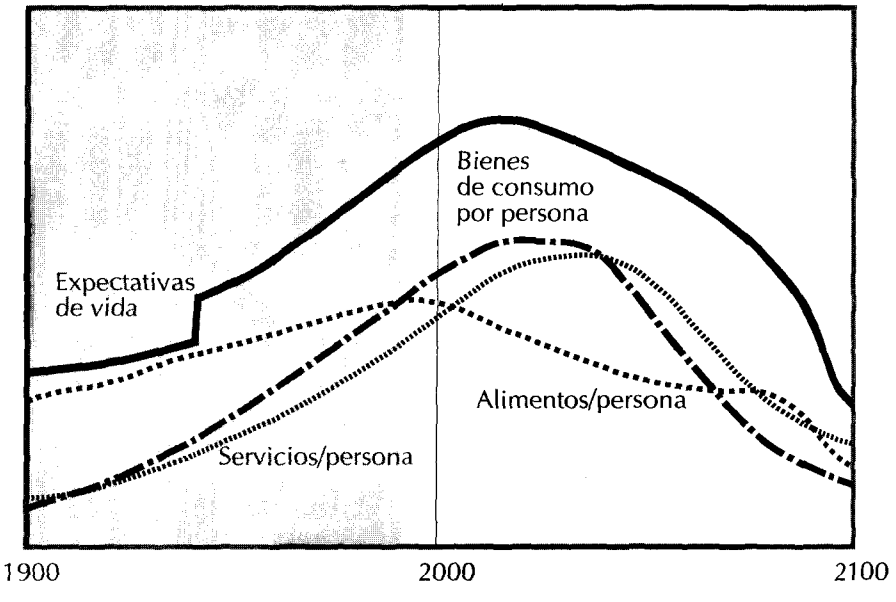
Si el modelo del mundo añade a su tecnología de control de la contaminación una variedad de tecnologías para incrementar en forma acentuada el rendimiento por unidad de tierra, la gran intensidad en la utilización de la tierra acelera su pérdida. Los productores del mundo obtienen cada vez más rendimiento de parcelas cada vez más pequeñas, a un coste cada vez mayor para el sector de capital.

ESCENARIO 4

Estado del mundo



Nivel material de vida



Ciertamente, afirmará el lector, ninguna sociedad en sus cabales mantendrá una tecnología que destruye la tierra al mismo tiempo que incrementa el rendimiento. Hay muchos casos recientes de este tipo de comportamiento en el mundo (por ejemplo, la tierra perdida por la acumulación de sal en el valle central de California, mientras las tierras próximas son empujadas hacia una mayor tasa de rendimiento creciente), pero imaginemos un mayor grado de racionalidad por parte de las generaciones venideras. Añadamos tecnologías de protección de la tierra a las de control de la contaminación y a las de incremento del rendimiento de la tierra.

En el mundo de la informática, basta con proponerse algo para que ello se materialice. El escenario 5 muestra los resultados de todos esos cambios ocurriendo al mismo tiempo. En este escenario damos por supuesto que, a partir de 1995, los programas técnicos ya descritos que reducen la contaminación por unidad industrial de producto e incrementan el rendimiento de la tierra han sido incorporados, pero añadimos un programa que reduce la erosión global de la tierra por un factor de 3. Los dos primeros programas incorporados requieren inversión de capital, el tercero damos por supuesto que no la requiere.

El resultado del escenario 5 no es una crisis de recursos, contaminación o tierra, sino de todos esos sectores más o menos al mismo tiempo.

El alimento es suficiente, la contaminación es tolerable, la economía crece, la expectativa de vida aumenta, hasta aproximadamente el año 2020, cuando el coste de las diversas tecnologías, además del coste creciente de la obtención de recursos, simplemente exige más capital en cualquier momento del proceso que el que la economía puede proveer.

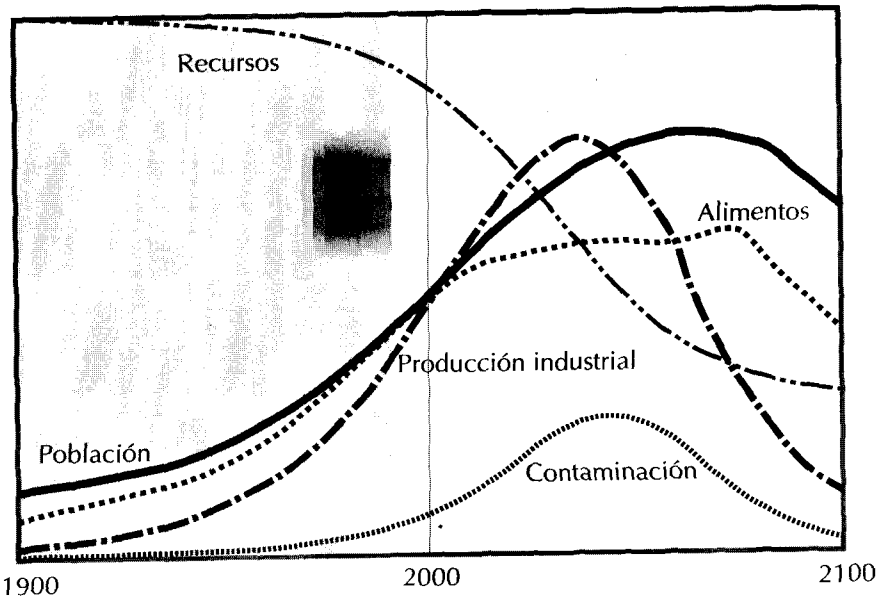
Podríamos emprender un debate acerca de cuál de las prioridades abandonaría en primer lugar una sociedad tensionada en tantas direcciones. ¿Permitiría la erosión de la tierra, reduciría los insumos agrícolas,

Escenario 5 DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN, INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE LA TIERRA Y PROTECCIÓN DE LA EROSIÓN DEL SUELO

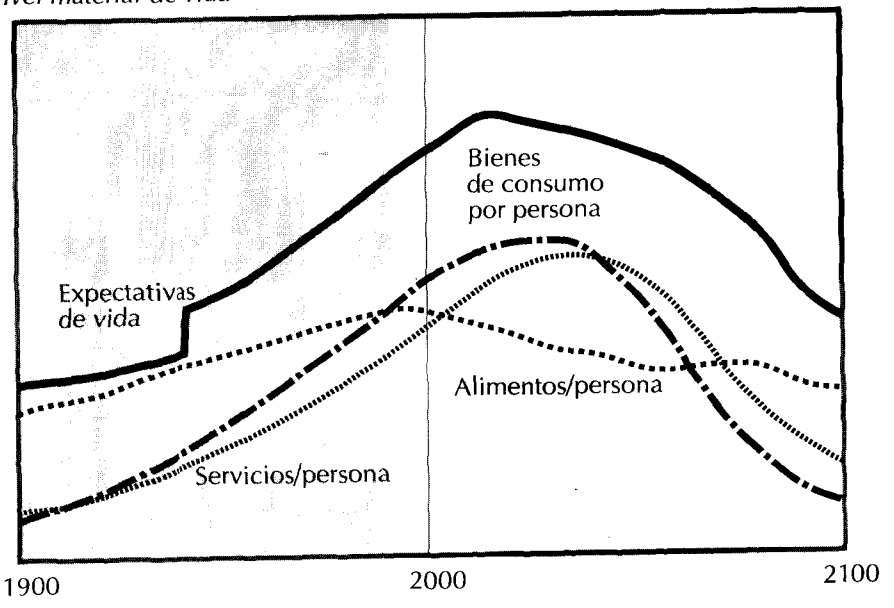
En este ensayo se ha añadido un programa de preservación de la tierra a los sistemas de incremento del rendimiento del suelo y a las medidas de control de contaminación ya ensayadas. El resultado es un mayor crecimiento de la población y el capital, que no desemboca en una crisis de recursos, contaminación o tierras, sino en los tres sectores al mismo tiempo.

ESCENARIO 5

Estado del mundo



Nivel material de vida



toleraría un incremento de la contaminación o subsistiría con un menor flujo de materiales? En World3 se da por supuesto que se daría una gran prioridad a los materiales, a fin de ir generando los productos industriales necesarios para mantener en funcionamiento el resto de la economía. Esa elección particular, y el comportamiento exacto del modelo una vez que el capital se ha hecho insuficiente, carece de importancia. No pretendemos ser capaces de predecir qué haría el mundo si se encontrara realmente en semejante encrucijada. Lo importante es simplemente que semejante riesgo es posible. Es una forma más en que puede manifestarse el comportamiento de *sobrepasamiento* y colapso.

Si los recursos son el golpe final que ocasiona el colapso en el escenario 5, entonces un programa de ahorro de recursos, agregado a todos los otros, debería ayudar. En el escenario 6 se inicia el ensayo de simulación del año 1995 con un programa que reduce la cantidad de recursos no renovables necesarios por unidad de producción industrial en un 3% anual hasta que el consumo total de recursos decrece hasta los niveles de 1975 (esto también reduciría la generación de contaminación). Entretanto, también se conservan operativos los programas de tecnologías de control de la contaminación, de rendimiento del suelo y control de la erosión de la tierra.

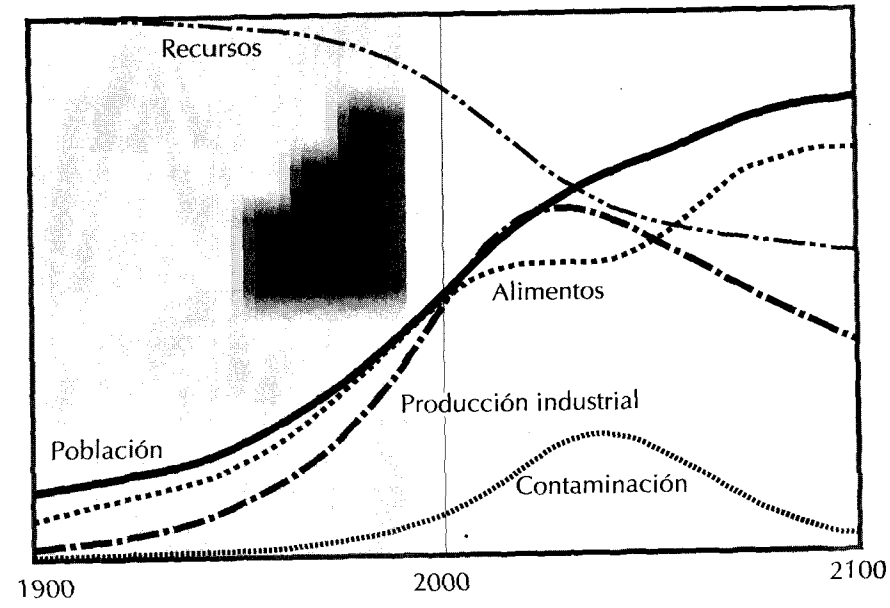
Esta combinación de tecnologías permite que la simulación de la economía mundial siga creciendo ligeramente hasta mediados del siglo XXI. Los recursos no renovables se agotan lentamente; su coste se mantiene bajo. La producción de alimentos crece en forma gradual. La contaminación crece lo suficiente como para rebajar la fertilidad de la tierra, pero su efecto puede suprimirse mediante insumos agrícolas adicionales. La población se nivela en torno a los 10.000 millones.

Escenario 6 DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN, INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE LA TIERRA, PROTECCIÓN DE LA EROSIÓN DEL SUELO Y TECNOLOGÍA EFICIENTE EN RECURSOS

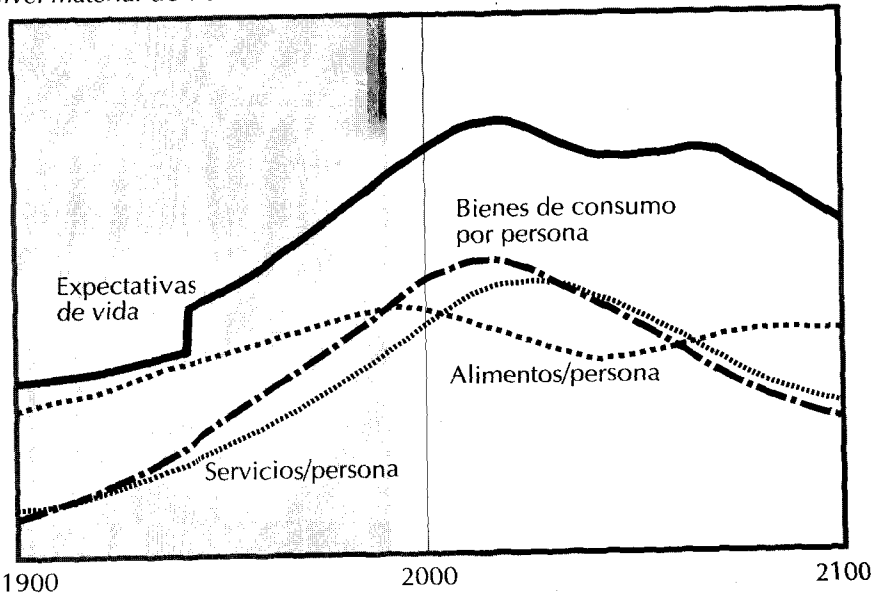
Ahora el mundo simulado está desarrollando poderosas tecnologías para reducir la contaminación, incrementar el rendimiento de la tierra, proteger los suelos y conservar los recursos renovables a un mismo tiempo. Se supone que todas estas tecnologías insumen capital y su implantación completa requiere veinte años. Combinadas, permiten al mundo simulado proseguir su crecimiento hasta el año 2050. Lo que finalmente detiene el crecimiento es el coste acumulado de las tecnologías.

ESCENARIO 6

Estado del mundo



Nivel material de vida



No se nivela a causa de una transición demográfica en la que la tasa de natalidad desciende para equipararse a la tasa de mortandad. En lugar de ello, a partir del 2020, la tasa de mortandad comienza a elevarse lentamente hasta igualar a la tasa de natalidad.

¿Por qué se eleva la tasa de mortandad? No por una crisis manifiesta. La creciente eficacia técnica logra evitar con éxito el colapso súbito. Pero el mundo simulado sigue sobrepasando sus límites, como pone en evidencia la lenta caída de la producción industrial y la erosión continuada del nivel de vida material. La producción industrial decae porque el coste creciente de proteger a la población de la inanición, contaminación, erosión y escasez de recursos reduce la inversión disponible para sostener el crecimiento.

Después de la simulación del año 2020 en el escenario 6, la expectativa de vida cae, primero en forma lenta y luego rápidamente, principalmente porque la economía en retroceso no es capaz de mantener un alto nivel en los servicios sanitarios. La alimentación *per cápita* se estanca; los bienes de consumo por persona descienden sistemáticamente a partir del 2015. Dado que la contaminación se abre camino a través del ecosistema en forma lenta y los agentes contaminantes tienen una larga vida media, la contaminación prosigue su ritmo ascendente durante dos décadas después de que sus emisiones han comenzado a reducirse, aunque su nivel nunca se eleva lo suficiente como para afectar a las expectativas de vida de la población global.

Ésta es una sociedad que está utilizando su creciente potencial técnico para mantener el crecimiento, mientras el crecimiento, por su parte, mina los efectos de esas tecnologías. En última instancia, esta simulación del mundo no es capaz de sostener su nivel de vida a medida que su tecnología se hace demasiado cara y su medio ambiente se degrada.

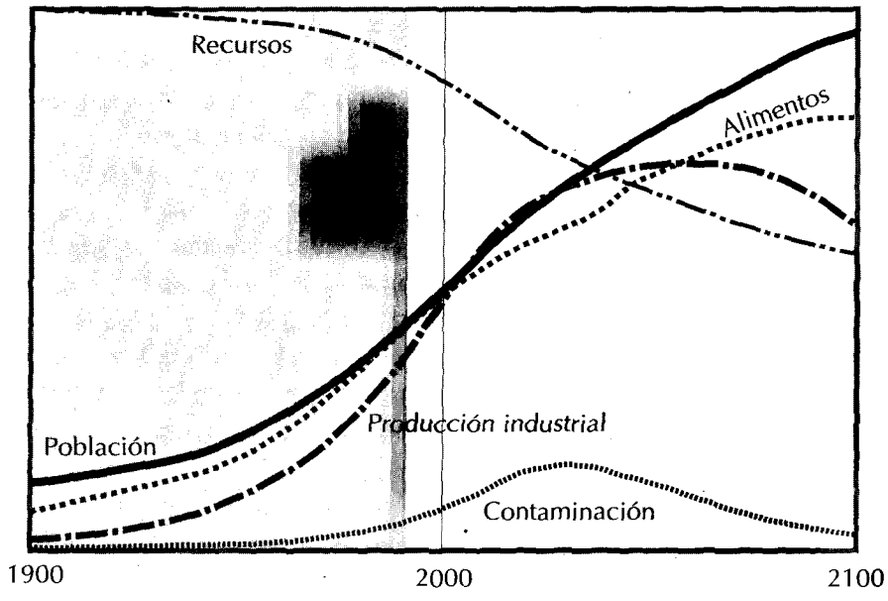
¿Qué ocurriría si las tecnologías se incorporaran a una mayor velocidad? ¿Qué pasaría si los retrasos en su desarrollo e implantación se reducen de veinte años a cinco años?

Escenario 7 APLICACIÓN DE TODAS LAS TECNOLOGÍAS CON MENOR RETRASO

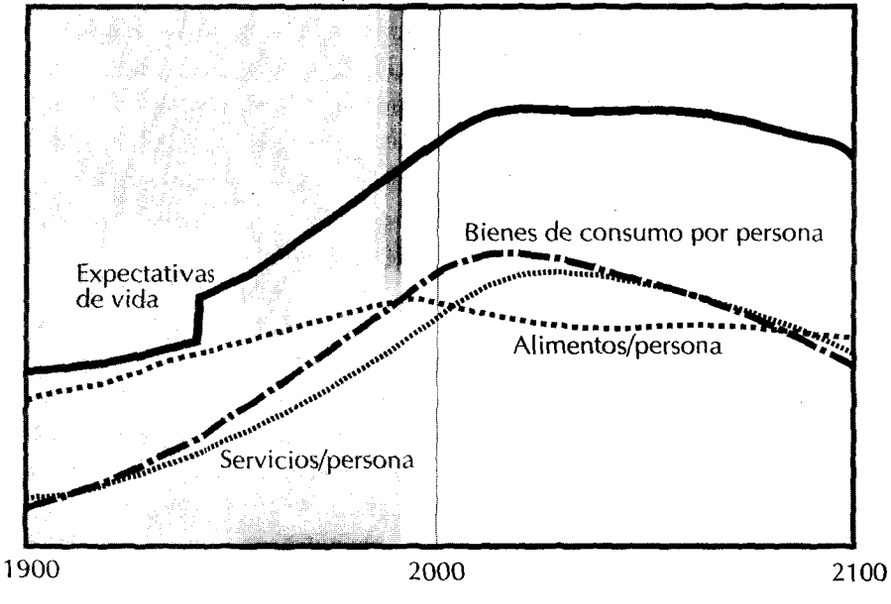
Este ensayo de modelo es igual que el anterior, con la diferencia de que se supone que el tiempo de implantación de las tecnologías en todo el mundo es de cinco años en lugar de veinte. La producción industrial crece durante veinte años más que en el escenario 6 y la población supera a la anterior en 2.000 millones. Pero el nivel material de vida cae lentamente. El coste creciente de mantenerse fuera de los límites finalmente detiene el crecimiento industrial.

ESCENARIO 7

Estado del mundo



Nivel material de vida



El escenario 7 muestra los resultados. Aquí tenemos control de la contaminación, una reducción en la utilización de los recursos, un incremento en el rendimiento de la tierra, y control de la erosión, conjunto de elementos que comienzan a ser implantados a nivel mundial en el año 1995 y se van haciendo más eficientes durante toda la simulación del siglo XXI. Cada nuevo elemento, cada nuevo proceso, cada nuevo instrumento para hacer más lento el agotamiento, o para combatir la contaminación, se instala en el mundo en un plazo de cinco años.

En este ensayo la producción industrial crece durante treinta años más que en el escenario 6. La población crece hasta los 12.500 millones de personas mientras que los alimentos *per cápita* mantienen un nivel adecuado, pero no abundante. El promedio de alimentos por persona queda levemente por debajo de su nivel de 1990; la producción de alimentos se eleva sistemáticamente pero aproximadamente a la misma tasa que la población. La contaminación se mantiene a niveles bastante bajos. Las fuentes de recursos no renovables no se hacen escasas, aunque decrecen en forma constante. Los bienes de consumo por persona declinan gradualmente a partir del 2015; los servicios por persona decaen después del 2020; la producción industrial total se estanca tras el 2050 y declina después del 2075.

La simulación de sociedad mundial del escenario 7 es previsora, altamente tecnificada, y frugal. Al saltar por delante de sus problemas antes de que una crisis mundial le obligue a hacerlo, logra sostener a una creciente población a niveles decentes de vida a lo largo de todo el siglo XXI. Pero en la segunda mitad de dicho siglo, su calidad material de vida comienza a descender. Su gran población, viviendo con moderados insumos globales, sigue sobrecargando los límites de la tierra. El coste creciente de mantenerse en los límites frena primero, y luego deprime, el crecimiento industrial.

Tras una sesión de trabajo con un modelo, informático o mental, es una buena idea volver atrás un momento para recordar que no es con el "mundo real" con lo que se ha estado experimentando, sino con una representación del mundo que es "realista" en algunos aspectos e "irreal" en otros.

La tarea es descubrir cualquier intuición interna (*insight*) del modelo y evaluar dónde acaba su "realismo" y comienzan sus incertidumbres o simplificaciones deliberadas. Al final de esta serie de ensayos de ordenador, es necesario detenerse y volver a tomar perspectiva.

World3, debemos recordar, no distingue entre las regiones ricas y las regiones pobres del mundo. Todas las señales de hambre, escasez de recursos

y contaminación se asume que se irradian hacia el mundo en su conjunto, y que las respuestas a ellas emanan de la capacidad global del mundo de hacerles frente. Eso puede hacer al modelo excesivamente optimista. En el "mundo real", si el hambre se concentra especialmente en África, si las crisis de contaminación se centran sobre todo en Europa del Este, si la degradación de la tierra se registra esencialmente en los trópicos, si las personas que antes sufren los problemas son las que tienen menor capacidad económica y técnica para responder, eso puede suponer retrasos muy grandes antes de que se corrijan los problemas. Por lo tanto, el sistema "real" puede que no responda con la fuerza o con el éxito que simula el sistema de World3.

El mercado de funcionamiento perfecto y las tecnologías suaves y exitosas (sin "efectos colaterales" sorprendentes) del modelo, son probablemente demasiado optimistas. También lo es el supuesto de que las decisiones políticas carecen de costes y no sufren retrasos.

Debemos recordar también que el modelo World3 carece de un sector militar que drene recursos de capital y recursos de la economía productiva. Carece de guerras en las que muere gente, se destruye capital, se devasta la tierra o se genera contaminación. Carece de disturbios civiles, huelgas, corrupción, inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas, Chernobils, epidemias de sida o sorprendentes fracasos en el medio ambiente. En este amplio sentido es optimista hasta el extremo. El modelo podría estar representando las posibilidades más altas del "mundo real".

Por otra parte, algunos podrían afirmar que las tecnologías del modelo son demasiado limitadas. Ellos imprimirían más velocidad a los procesos tecnológicos del modelo, para acelerar su introducción o quitar límites a los alcances de la técnica (ver ilustración 4-7). Nuestros supuestos sobre recursos por descubrir, tierra cultivable y contaminación absorbible puede que sean demasiado bajos. También pueden ser demasiado altos. Hemos intentado que sean moderados, dadas las estadísticas de que hemos dispuesto y nuestra propia valoración de las posibilidades técnicas.

Con todas estas incertidumbres, no se trataba para nosotros de leer los desarrollos exactos en los diversos escenarios con una precisión cuantitativa. Por ejemplo, no tomamos como dato significativo el hecho de que una crisis de alimentos aparece en el escenario 3 antes que una crisis de recursos. Podría muy bien ocurrir al revés. No llegaríamos a jurar que el mundo pueda soportar una población de 12.000 millones de personas moderadamente bien durante cincuenta años, tal como se presenta en el escenario 7. No predecimos una caída de la producción industrial exactamente en el

año 2075. Las cifras no son lo suficientemente buenas como para que los resultados del World3 puedan ser leídas de esa forma.

Entonces, ¿qué es lo que podemos aprender de estos ejercicios de modelización tecnológica?

Por qué la tecnología y los mercados por sí solos no pueden evitar el sobrepasamiento

Una de las lecciones de estos ensayos es que en un mundo finito y complejo, si se elimina o eleva un límite, mientras se continúa creciendo, se encuentra un nuevo límite. Especialmente si el crecimiento es exponencial, el límite siguiente se presentará con una velocidad sorprendente. Hay *capas de límites*. World3 contiene sólo algunas. El "mundo real" contiene muchas más. Muchas de ellas son distintivas, específicas y varían localmente. Sólo unos pocos límites, como la capa de ozono o los gases de efecto invernadero, son realmente globales.

Sería de esperar que distintas partes del "mundo real", si continúan creciendo, se encuentren con diferentes límites en diferente orden y en distintas épocas. Pero la experiencia de límites múltiples y sucesivos en cualquier sitio único, pensamos, se desarrollaría de forma similar a como lo hace el World3. Y en una economía mundial crecientemente interconectada, una sociedad bajo tensión en cualquier sitio envía ondas que se sienten en todas partes. El libre comercio refuerza la posibilidad de que esas partes del mundo incluidas en zonas de libre comercio alcancen los límites de forma simultánea.

Una segunda lección es que, cuanto más exitosamente las sociedades aparten de sí los límites mediante adaptaciones técnicas y económicas, más probable será que en el futuro varias de ellas se topen con los límites al mismo tiempo. En la mayoría de los ensayos con el World3, incluidos muchos que no se reflejan en este libro, el mundo no se queda desabastecido de tierra, alimentos, recursos o capacidad de absorción de la contaminación, simplemente se queda sin recursos para hacer frente a una emergencia global.

Esta "capacidad para hacer frente a una contingencia" está representada en el World3, muy sumariamente, por una sola variable: la cantidad de producto industrial disponible cada año para su inversión en la solución de diversos problemas. En el "mundo real" hay otros componentes en la capacidad para hacer frente a las contingencias: la cantidad de personas debidamente instruidas, la cantidad de atención política, el riesgo financiero que se

puede asumir, la capacidad institucional, la habilidad en la gestión. Todas estas capacidades pueden crecer en el tiempo, si la sociedad invierte en su desarrollo. Pero, en un momento dado, son limitadas. Pueden procesar y hacerse cargo de una cantidad determinada. Cuando los problemas surgen en forma exponencial y en múltiplos, aun cuando esos problemas puedan ser enfrentados uno a uno, la capacidad de hacerles frente puede ser desbordada.

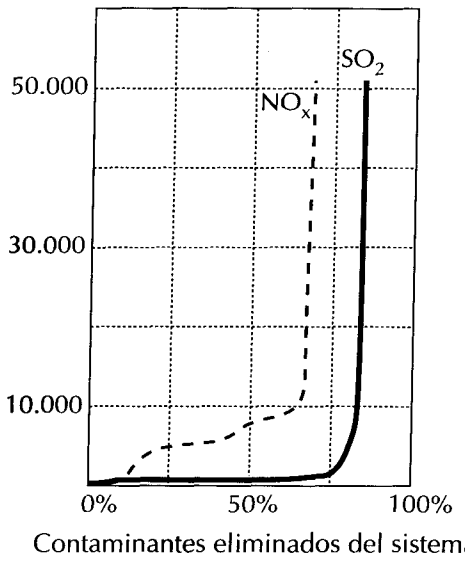
El tiempo es en realidad el límite último en el modelo World3 —y, creemos, también en el "mundo real"—. La razón por la que el crecimiento, y en especial el crecimiento exponencial, es tan insidioso, es que acorta los plazos para la acción efectiva. Sobrecarga de tensión un sistema a una velocidad creciente, hasta que los mecanismos que podían hacer frente a ritmos de cambio más lentos finalmente comienzan a fallar.

Hay otras tres razones por las cuales los mecanismos tecnológicos y de mercado que funcionan bien en una sociedad de cambios más lentos no pueden resolver los problemas generados por una sociedad que se dirige hacia límites interrelacionados a un ritmo exponencial. Una es que estos mecanismos de ajuste tienen, en sí mismos, sus costes. La segunda es que ellos mismos actúan en función de bucles de retroalimentación, con distorsiones informativas y retrasos. La tercera es que el mercado y la tecnología son meros instrumentos al servicio de los objetivos, la ética y las perspectivas temporales de la sociedad en su conjunto. Si los objetivos están orientados hacia el crecimiento, la ética es injusta y los horizontes temporales son cortos, la tecnología y los mercados pueden acelerar un colapso en lugar de evitarlo.

Los costes de la tecnología y del mercado están en los recursos, energía, dinero, trabajo y capital. Esos costes tienden a crecer en forma no lineal a medida que se acercan los límites, lo que es otra fuente de sorpresas en el comportamiento de los sistemas.

Ya hemos mostrado en las ilustraciones 3-17 y 4-6 cómo los residuos y la energía necesaria para extraer recursos no renovables se elevan en forma espectacular a medida que el tenor de los recursos se reduce. La ilustración 6-1 muestra otras dos curvas ascendentes de costes: el coste por tonelada para hacer inocuos los contaminantes dióxido de azufre y óxido de nitrógeno como una función de la cantidad total eliminada de una chimenea industrial o de un tubo de escape. Es relativamente barato eliminar casi el 80% del dióxido de azufre de las emisiones de chimeneas. Hay un coste ascendente pero abordable para eliminar hasta el 70% de los óxidos de nitrógeno. Pero entonces surge un límite, un umbral, traspasado el cual los costes de una depuración mayor se elevan enormemente.

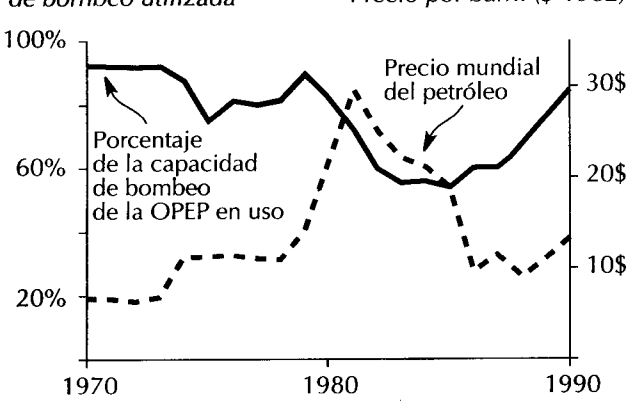
Ilustración 6-1 COSTES NO LINEALES DE ELIMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN



Los contaminantes del aire SO_2 y NO_x pueden ser eliminados de los gases de chimeneas industriales hasta un nivel significativo a bajo coste, pero a cierto nivel de reducción los costes de una mayor eliminación se elevan precipitadamente. La curva de costes para la eliminación del SO_2 representada aquí está calculada para Europa del Este en marcos alemanes (DM/ton); la curva del NO_x es para Europa del Oeste. (Fuente: *J. Alcamo et al.*).

Es posible que nuevos avances técnicos desplacen ambas curvas un poco más hacia la derecha, haciendo posible una limpieza más profunda. Pero las curvas tendrán siempre la misma forma. Hay razones físicas fundamentales para que los costes de eliminación se disparen al pretender una eliminación al 100%. Si el número de fuentes de emisión continúa creciendo, se encontrarán esos costes al alza. Podría ser asequible reducir a la mitad los contaminantes emitidos por los coches. Pero, si el número de coches se duplica, es necesario cortar la emisión de cada coche otra vez a la mitad sólo para mantener la misma calidad de aire. Dos duplicaciones requerirían una reducción de las emisiones contaminantes de un 75%. Tres duplicaciones requerirían un 87,5%, y para entonces el coste de una nueva reducción sería imposible de afrontar.

Ilustración 6-2 UTILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA OPEP Y PRECIOS MUNDIALES DEL PETRÓLEO



Con virtualmente casi toda la capacidad de producción de la OPEP en uso en la década de 1970, pequeñas interrupciones en el flujo de combustible precipitaron súbitas y violentas oscilaciones de los precios. La estabilización de dichas oscilaciones se demoró una década y ocasionó turbulencias económicas en todo el mundo, tanto al subir como al bajar. (Fuentes: *Departamento de Energía de EE UU*; *Oil & Gas Journal*).

Los retrasos en la respuesta del mercado y de la tecnología pueden ser mucho mayores que lo que la teoría económica u otros modelos mentales pueden hacer suponer. El bucle de retroalimentación entre tecnología y mercado es una fuente de *sobrepasamiento*, oscilación e inestabilidad. Un ejemplo de ello, sentido por todo el mundo, fue la escalada de precios de la década de 1970 y principios de la de 1980.

Hubo muchas causas para el "choque de los precios del petróleo" de 1973, pero una de las más importantes fue la escasez de capital para la producción petrolera (pozos de petróleo) en relación con el capital consumidor de petróleo (coches, hornos y otros equipos de combustión). A comienzos de la década de 1970 los pozos de petróleo del mundo estaban trabajando por encima del 90% de su capacidad de producción. A raíz de esta situación cualquier trastorno político en Oriente Próximo que cerrara incluso una pequeña fracción de la producción petrolera mundial no podría ser subsanado con un incremento de la producción en otros lugares del mundo. La única respuesta posible del mercado era elevar los precios.

Ese incremento de precios, y otra segunda ola de aumentos en 1979 (ver ilustración 6-2), desató una ola salvaje de respuestas técnicas y económicas. Del lado de la oferta se procedió a perforar más pozos y se instaló una mayor capacidad de bombeo. Los depósitos marginales de petróleo se convirtieron en rentables y entraron en producción. La prospección, construcción y explotación de instalaciones petrolíferas, desde los pozos hasta las refinerías pasando por los buques cisterna, exigió tiempo.

Mientras tanto, los consumidores reaccionaban a los precios más altos mediante la conservación. Los fabricantes de automóviles comenzaron a producir modelos más eficientes. La gente comenzó a invertir en la aislación de viviendas. Las empresas productoras de electricidad cerraron sus generadores de combustión de petróleo, e invirtieron en la instalación de quemadores de carbón o generadores nucleares. Los gobiernos impusieron diversas formas de ahorro energético y promovieron el desarrollo de fuentes alternativas de energía. Ese conjunto de respuestas requirió años. En último término produjeron transformaciones duraderas en el capital físico.

Fueron necesarios casi diez años antes de que las diversas respuestas de mercado, la mayoría de las cuales debían ser traducidas a producción física y capital físico, finalmente comenzaran a lograr un nuevo equilibrio entre oferta y demanda. Para entonces, las medidas de conservación y los incrementos de producción se desarrollaban con tal inercia que se sobrepasaron. Para 1982 había un excedente de capital productivo comparado con las necesidades decrecientes del capital consumidor. Los miembros de la OPEP comenzaron a reducir su capacidad de bombeo. La utilización de su capacidad cayó del 90% al 50%. El precio mundial del petróleo comenzó a descender durante cuatro años consecutivos, hasta que en 1985 cayó en picado.

Así como antes había subido en exceso, el precio cayó luego demasiado bajo. A medida que las instalaciones de producción de petróleo cerraban y las áreas productoras sufrían una depresión, los esfuerzos de conservación fueron abandonados. Los diseños de coches más eficientes fueron abandonados en las estanterías. La inversión en fuentes alternativas de energía se secó. Tras otros diez años, más o menos, a medida que estos mecanismos de ajuste tomen mayor cuerpo en la dirección opuesta, establecerán las condiciones para un nuevo desequilibrio de capitales y desatarán la futura crisis de incremento de precios.

Este mecanismo de *sobrepasamiento* de un lado y de alcance insuficiente del otro fue consecuencia de inevitables retrasos de respuesta en los mercados del petróleo. Provocaron grandes movimientos en la riqueza de naciones e individuos, enormes deudas y excedentes, auges y caídas y crisis bancarias,

todo ello fruto de intentar ajustar el tamaño relativo del capital productivo y del capital consumidor en torno al petróleo. Ninguna de estas alzas y bajas de los precios estuvieron relacionadas con la cantidad efectiva de petróleo en el subsuelo (que descendía en forma sistemática) o con los efectos de la perforación, transporte, refino y combustión de petróleo sobre el medio ambiente. La señal del precio sólo brinda información sobre la escasez o excedentes relativos de los pozos de petróleo, pero no —al menos hasta el final mismo del proceso de agotamiento— sobre la escasez de petróleo.

Las señales del mercado tales como el precio del petróleo son muy ruidosas, demasiado tardías, excesivamente amplificadas por la especulación, y demasiado manipuladas por grupos de interés públicos y privados como para dar al mundo señales claras acerca de los límites físicos que se aproximan. El mercado es ciego para el largo plazo y no presta atención a las fuentes y sumideros últimos, hasta que están ya demasiado agotados, cuando ya es demasiado tarde para actuar. Las señales económicas y las respuestas tecnológicas pueden evocar poderosas respuestas, como pone de manifiesto el ejemplo del precio del petróleo, pero sencillamente no están conectadas con el sistema de la tierra en los sitios precisos para dar información útil sobre los límites.

Por último, está la cuestión de los objetivos que persiguen la tecnología y los mercados. Son simplemente herramientas. No tienen más sabiduría inherente, visión de futuro, moderación o compasión que la sociedad humana que los produce. Los resultados que ocasionan en el mundo dependen de quien los maneja y de sus objetivos. Si están al servicio de la trivialidad, desigualdad o violencia, eso es lo que producirán. Si se les pide que sirvan a objetivos imposibles, como la constante expansión física sobre un planeta finito, habrán de fracasar. Si se ponen al servicio de objetivos realizables y sostenibles, tal como veremos en el próximo capítulo, pueden ayudar a mantener una sociedad sostenible.

El progreso tecnológico y la flexibilidad del mercado son herramientas esenciales para una sociedad sostenible. Cuando el mundo decidió abandonar los CFC, fue la tecnología la que hizo posible el cambio con velocidad sorprendente. Cuando los precios de la energía no resulten distorsionados por intereses especiales e incluyan los costes medioambientales, el mercado alentará el desarrollo de fuentes de energía sostenibles cuyos costes puedan ser asumidos. No creemos que sea posible alcanzar el objetivo de un mundo sostenible sin creatividad tecnológica y empresarial. Pero no creemos que sea suficiente. Hay otras capacidades humanas a las que es preciso acudir para lograr que el mundo humano sea sostenible.

"Recuerdo haber capturado 5.000 libras de pescado con ocho redes. Hoy en día se necesitarían 80 redes. Por aquel entonces, el bacalao promedio de primavera pesaba entre 25 y 40 libras. Hoy en día pesan entre cinco y ocho libras". Ese comentario de un pescador del banco pesquero de George, en el Atlántico noroccidental[105], podría ser repetido, con diferentes cifras y especies, por pescadores de todo el mundo.

En 1990 la captura mundial total de pescado marino con fines comerciales bajó en unos cuatro millones de toneladas. Fue la primera caída significativa en la recolección de peces desde 1972. No hay forma de saber, hasta que hayan pasado muchos más años, si esta declinación es una hondonada temporal en una curva de crecimiento continuado, la primera oscilación a la baja en una conducta de *sobrepasamiento*, o el comienzo del colapso. Pero hay evidencia suficiente sobre un exceso de pesca e incluso de colapso de la reserva pesquera a escala local. La FAO considera que los mares no pueden soportar una captura comercial de más de 100 millones de toneladas métricas anuales de los recursos convencionales, que es aproximadamente el nivel más alto de captura registrado en 1989.

En nueve de las 19 zonas pesqueras del mundo bajo control de la FAO, las capturas de peces están por encima del límite inferior del rendimiento considerado sostenible[106]. En aguas de Estados Unidos, la National Fish and Wildlife Foundation afirma que 14 especies principales (que representan un 20% de la producción mundial de pescado) se encuentran seriamente amenazadas y que su recuperación podría requerir entre 5 y 20 años, aun en el caso de que cesara toda pesca[107]. Las poblaciones de atún de aleta azul, que normalmente viven unos 30 años y llegan a adquirir un peso de 1.500 libras, cayeron un 94% en los 20 años entre 1970 y 1990. La captura de camarón frente a los Cayos de Florida ha caído de 6,4 millones de libras por año a 2,4 millones de libras[108]. Frente a las costas de Kerala, en India, se estima que la flota pesquera es entre un 60% y un 100% más grande de lo sostenible[109]. La captura total de las aguas de Noruega se sostiene sólo mediante la captura de las especies menos codiciadas, porque las más deseadas comercialmente están en proceso de eliminación.

El Consejo General de Pesca del Mediterráneo advierte:

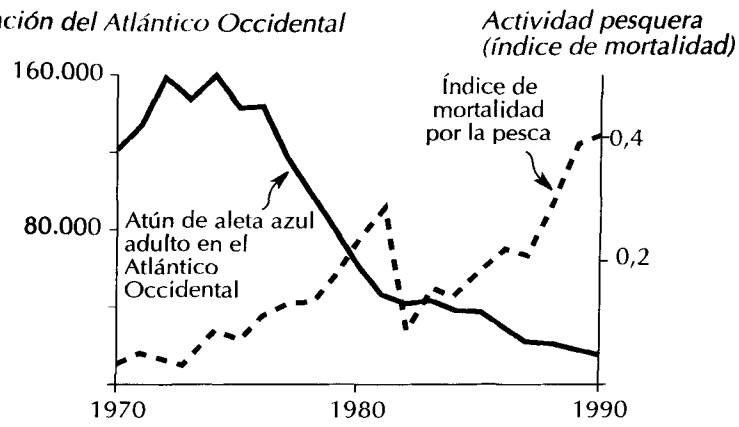
> Se sugiere que la influencia de la actividad humana en el medio marino... es de particular y seria preocupación global en la actualidad, y sus efectos más inmediatos... se manifiestan primero en los cuerpos de agua cerrados o semicerrados, como el Mediterráneo o el Mar Negro. En ellos, las poblaciones en crecimiento... los sectores pesqueros y... las actividades industriales, agrícolas y turísticas están afectando... a los caladeros de pesca, junto a otras actividades que afectan más tradicionalmente a los caladeros, como la gran actividad pesquera incontrolada[110].

La industria pesquera de todo el mundo goza de mercados relativamente libres y vigorosos, y ha visto en las dos últimas décadas extraordinarios desarrollos tecnológicos. Los buques-factoría refrigerados permiten a las flotas mantenerse en caladeros distantes sin tener que regresar a sus puertos de origen con la captura de forma inmediata. La detección por sonar, radar y satélite de los bancos de peces permite una creciente eficacia en las flotas. Redes de arrastre de hasta 45 kilómetros de largo permiten una pesca económica a gran escala aun en aguas profundas. El resultado es que cada vez más caladeros están sobrepasando sus límites sostenibles. La tecnología puesta en juego no es precisamente apta para el crecimiento de los *stocks* de peces, sino que pretende capturar hasta el último pez que sea posible.

> La pesca de arrastre en Nueva Inglaterra alcanzó su máximo en 1983 y desde entonces ha descendido en picado. Los *stocks* de platija y eglefino están alcanzando bajas récord. La población de bacalao ha caído. El atún y el pez espada virtualmente se han extinguido. Muchos pescadores de Nueva Inglaterra pasan una desagradable estrechez, víctimas de una mentalidad de cógelo-mientras-puedas. Ya antes hubo auges y bajas... Pero los científicos afirman que esta vez es diferente, porque las flotas son tan grandes y la tecnología tan buena que los peces ya no tienen donde esconderse[111].

Mucha gente comprende de forma intuitiva por qué está ocurriendo esto. Los peces son un recurso común. El mercado no da ninguna señal correctiva para mantener a los competidores al margen de la sobreexplotación de los caladeros; muy por el contrario, recompensa activamente a los que llegan primero y se llevan la mayor tajada[112]. Si el mercado da señales de escasez mediante un alza de precios, la gente más rica seguirá dispuesta a pagar ese precio más alto. En Tokio, el atún de aleta azul puede costar hasta 100 dólares la tonelada en el mercado de sushi[113]. Esos altos precios no son una señal de escasez y cautela; no inducen a la conser-

Ilustración 6-3 LA POBLACIÓN DE ATÚN DE ALETA AZUL DECLINA MIENTRAS SE INCREMENTAN LOS ESFUERZOS PESQUEROS



La población del Atlántico Occidental de atún de aleta azul de más de 10 años ha sido reducida en un 94%. Dado el alto valor de este pez, se mantienen los esfuerzos para pescarlo. (Fuente: *International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna*).

vación; perversamente alientan más esfuerzos pesqueros mientras la población de atún se acerca al agotamiento (ilustración 6-3). Y el mercado no asigna el pescado a aquellos que más necesitan alimentos, porque los hambrientos carecen de poder en el mercado.

> Los incrementos en la captura de pescado han ido a parar esencialmente a los países que pueden hacer frente a sus precios... Esta tendencia es alarmante porque indica el peligro potencial de que una proporción creciente de las capturas mundiales sea derivada hacia las capas de mayor poder adquisitivo en los países desarrollados... dejando menos pescado donde es más necesitado, en las regiones en desarrollo[114].

El ecologista Paul Ehrlich expresó una vez a un periodista japonés su sorpresa por el hecho de que la industria ballenera japonesa acabaría exterminando la fuente de su riqueza. El periodista contestó: "Usted está pensando en la industria ballenera como una organización que está interesada en mantener a las ballenas; en realidad, mejor mirada, semeja una gran cantidad de capital [financiero] intentando obtener la tasa más alta

de beneficio. Puede exterminar a las ballenas en 10 años y lograr un beneficio del 15%, pero con una captura sostenible sólo obtendría un beneficio del 10%, por lo tanto las exterminará en 10 años (para obtener el beneficio máximo). Después de eso, el dinero será destinado a exterminar algún otro recurso"[115]. (Un amigo nuestro escuchó un argumento similar de una empresa dedicada a talar maderas tropicales en Sabah).

Los operadores del mercado que están exterminando activamente recursos son extremadamente racionales. Lo que hacen tiene sentido, teniendo en cuenta las recompensas y restricciones que vislumbran desde el sitio que ocupan en el sistema. El fallo no está en la gente, está en el sistema. Un sistema de mercado sin regulación, gobernando un recurso común, inevitablemente lleva a sobrepasar sus límites y a la destrucción de los caladeros. Sólo restricciones políticas de algún tipo pueden proteger el recurso, y esas restricciones políticas no son fáciles de conseguir.

> Los biólogos marinos han aconsejado prohibir todas las capturas comerciales de bacalao en el mar Báltico el año próximo a causa del agotamiento de la especie. La Comisión de Pesca del Báltico, reunida en Varsovia, rechazó esta recomendación e intentó acordar una cuota reducida, pero debió suspender sus sesiones sin acuerdo[116].

Para salvar los recursos pesqueros mundiales del colapso haría falta algo más que fuerzas técnicas y de mercado. Explotadas sin ningún concepto de límites, los mercados y la tecnología son instrumentos del *sobrepasamiento*. Sin embargo, utilizadas dentro de los límites y guiadas por valores comunes de largo plazo, las fuerzas del mercado y los avances tecnológicos pueden ayudar a proveer a la industria pesquera del mundo con una rica captura que puede ser sostenida durante generaciones.

Resumen

El crecimiento exponencial de la población, el capital, la utilización de los recursos y la contaminación prosigue sobre el planeta. Lo impulsan los intentos por resolverproblemas humanos sentidos agudamente, desde el desempleo y la pobreza hasta la necesidad de posición social, poder y autoaceptación.

El crecimiento exponencial puede exceder cualquier límite en forma rápida. Si un límite es rechazado, el crecimiento exponencial volverá a encontrarse con otro a corto plazo.

Debido a los retrasos de retroalimentación, el sistema económico global está expuesto a la posibilidad de sobrepasarse y erosionar los límites sostenibles. Sin duda, para muchas fuentes y sumideros de importancia para la economía mundial, el *sobrepasamiento* ya es un hecho.

La tecnología y los mercados operan sólo con retrasos y sólo sobre información imperfecta; son en sí mismos procesos de retroalimentación negativa con retrasos de respuesta que amplifican la tendencia de la economía a sobrepasarse.

La tecnología y los mercados sirven a los valores de la sociedad o de los segmentos de la sociedad más poderosos. Si el objetivo primario es el crecimiento, producen crecimiento, mientras puedan. Si los objetivos primarios son la equidad y la sostenibilidad, también pueden servir a estos objetivos.

Una vez que la población y la economía han sobrepasado los límites físicos de la tierra, hay sólo dos formas de regresar: el colapso involuntario ocasionado por la escasez y las crisis crecientes, o una reducción controlada de los insumos globales por elección social deliberada.

En el siguiente capítulo veremos lo que ocurre cuando las mejoras tecnológicas se combinan con decisiones sociales deliberadas para limitar el crecimiento.

Capítulo 7:

TRANSICIÓN HACIA UN SISTEMA SOSTENIBLE

El estado estacionario haría pocas exigencias a los recursos de nuestro medio ambiente, pero mucho más grandes serían las demandas sobre nuestros recursos morales.

HERMAN DALY[117]

El mundo humano puede responder de tres formas a las señales de que la utilización de los recursos y la emisión de contaminantes han crecido más allá de los límites sostenibles.

Una forma es disfrazar, negar, confundir las señales: construir por ejemplo chimeneas más altas, o verter los residuos tóxicos de forma secreta o ilegal en un territorio ajeno; sobreexplotar la población de peces o los recursos forestales a sabiendas, argumentando la necesidad de defender el empleo o pagar deudas, cuando en realidad se está poniendo en peligro el sistema natural del cual dependen el empleo y el pago de las deudas; la búsqueda de más recursos mientras se desperdician sin consideración los que ya están descubiertos; controlar los precios que están subiendo en respuesta a la escasez, o trasladar costes al medio ambiente o a pueblos lejanos o a generaciones venideras; negarse a discutir el crecimiento de la población porque el tema es políticamente demasiado sensible. Estas respuestas (y falta de respuestas) son negativas a tratar los problemas planteados por los límites, y aseguran para el futuro problemas aún mayores.

Una segunda forma de responder es aliviar las presiones de los límites mediante artificios tecnológicos o económicos sin modificar sus causas subyacentes: reducir la cantidad de contaminación generada por kilómetro recorrido o por kilovatio de electricidad generado; buscar más recur-

sos, usar los recursos con mayor eficiencia, reciclar los recursos, sustituir un recurso por otro; reemplazar algunas funciones que desempeñaba la naturaleza con capital y trabajo humano, tales como la fertilización de la tierra, el tratamiento de los residuos cloacales o el control de las inundaciones; desarrollar mejores píldoras anticonceptivas. Éstas son medidas que se necesitan con urgencia. Muchas de ellas permitirán aliviar las tensiones temporalmente. Pero ninguna de ellas hace nada respecto a las causas subyacentes de las presiones.

La tercera forma de respuesta es dar un paso atrás y reconocer que el sistema socioeconómico humano, tal como está estructurado en la actualidad, no es gestionable, ha sobrepasado sus límites y se dirige hacia el colapso, y, consecuentemente, cambiar las estructuras del sistema.

En lenguaje cotidiano, la frase "cambiar las estructuras" tiene una serie de connotaciones imprecisas, en su mayoría ominosas. Es utilizada por revolucionarios para describir el proceso de toma del poder, exigiendo habitualmente una retribución sangrienta en el proceso. Muchas personas entienden el cambio de estructuras como un cambio de las estructuras físicas, derribando y reconstruyendo, construyendo un nuevo mundo. La mayoría de la gente teme que el cambio de estructuras sea difícil, caro y amenazador para su seguridad.

En el lenguaje de sistemas, "cambiar estructuras" tiene un significado preciso que nada tiene que ver con desalojar a alguien del poder, acabar con un régimen político o gastar dinero. En realidad, hacer cualquiera de esas cosas sin cambios reales en la estructura tendrá claramente por resultado el que otra gente gaste la misma cantidad de dinero en un nuevo sistema que produce los mismos viejos resultados.

En términos de sistemas, cambiar estructuras significa cambiar los eslabones de información en un sistema: el contenido y la serie temporal de los datos con que los actores en el sistema deben trabajar, los objetivos, los incentivos, los costes, y las retroalimentaciones que motivan o restringen la conducta. La misma combinación de gente, instituciones y estructuras físicas puede comportarse de modo completamente distinto, si sus actores pueden ver una buena razón para hacerlo, y si disponen de la libertad para cambiar. Con el tiempo, un sistema con una nueva estructura de información puede transformarse social y físicamente. Puede desarrollar nuevas instituciones, nuevas reglas, nuevos edificios, gente adiestrada para nuevas funciones. Esa transformación puede ser natural, gradual y pacífica.

Los cambios generalizados se despliegan espontáneamente de nuevas estructuras informativas. Nadie necesita someterse a sacrificios o armarse, salvo, quizá, para impedir que alguna gente prosiga deliberadamente conduciendo, distorsionando o ignorando la información. La historia humana está llena de transformaciones estructurales, las dos más profundas de las cuales han sido la revolución agrícola y la revolución industrial. En realidad, es el éxito de esas pasadas transformaciones lo que ha llevado al mundo a la necesidad de la siguiente transformación.

World3 no puede comenzar a representar la dinámica evolucionista de un sistema mundial que se está estructurando de una forma distinta. Pero puede ser utilizado para ensayar algunos de los cambios más simples que pueden producirse en una sociedad que decide restructurarse a sí misma para reducir la probabilidad de *sobrepasamiento* y colapso.

En el capítulo anterior hemos utilizado el modelo World3 para ver qué ocurre si el mundo hace cambios cualitativos y no estructurales. Hemos alimentado dentro del modelo límites más altos, retrasos más breves, respuestas técnicas más rápidas y poderosas, y ciclos de erosión más débiles. Si hubiéramos eliminado por completo esos rasgos estructurales —ausencia de límites, ausencia de retrasos y ausencia de erosión—, habríamos eliminado la conducta de *sobrepasamiento* y colapso por entero (tal como hicimos en la ilustración 4-7, el ensayo *Infinity In, Infinity Out*). Pero límites, retrasos y erosión son propiedades físicas del planeta. Los seres humanos los pueden mitigar o los pueden ampliar, manipular con tecnologías, y vivir dentro de ellos con diversos grados numéricos de libertad, pero los seres humanos no pueden hacer que desaparezcan por completo.

Las causas estructurales de *sobrepasamiento* sobre las que la gente tiene más poder, creemos, son las únicas que no hemos cambiado en el capítulo VI, principalmente aquellas que ocasionan el crecimiento exponencial en la población humana y en el sistema económico. Son las normas sociales, objetivos, incentivos y costes que llevan a la gente a desear algo más que un número de hijos de repuesto. Son las expectativas y prácticas culturales que distribuyen el ingreso y la riqueza en forma desigual, que hacen que la gente se vea a sí misma esencialmente como consumidora y productora, que asocian la posición social con la acumulación material, y que definen los objetivos humanos en términos de obtener más en lugar de tener lo suficiente.

En este capítulo cambiaremos los bucles positivos que empujan el crecimiento exponencial del sistema mundial. Llegaremos a la pregunta de cómo descabalgar del estado de *sobrepasamiento* desde una nueva dirección, comenzando no con los límites, retrasos o erosión, sino con las fuerzas estructurales que ocasionan el crecimiento.

Restricciones deliberadas al crecimiento

Supongamos que, a partir de 1995, todas las parejas del mundo comprendieran las consecuencias de un ulterior crecimiento de la población para el bienestar de sus propios hijos. Supongamos que toda la gente tuviera asegurados por parte de sus sociedades aceptación, respeto, seguridad material y cuidado en la tercera edad, independientemente del número de hijos que tuviera. Supongamos por añadidura que se convirtiera en norma social criar a cada niño con los niveles más altos posibles de nutrición, vivienda, asistencia sanitaria y educación. Supongamos que, como consecuencia de asumir estos presupuestos, todas las parejas deciden limitar su descendencia a dos hijos (en promedio), y que disponen de las tecnologías de control de la fertilidad necesarias para lograr la dimensión de familia que desean.

Estos cambios supondrían desplazamiento en los costes y beneficios perceptibles, un aumento del horizonte temporal, una capacidad de ver el conjunto social, y disponibilidad de nuevos poderes y responsabilidades —en resumen, una reestructuración informativa similar a la que ya ha hecho descender la tasa de natalidad de muchas poblaciones en el mundo industrializado.

Con hacer sólo este cambio, y ningún otro, en el sistema de World3, los resultados serían los que se muestran en el escenario 8, que debería ser comparado con el escenario 2.

Para generar este escenario hemos dispuesto que el tamaño de la familia media deseada del modelo de población sea de dos niños y la efectividad del control de natalidad sea del 100% después de la simulación del año 1995. Como resultado, la población mundial del modelo se modera en gran medida, pero la inercia de la estructura de edad lleva la población hasta los 6.000 millones en el año simulado 2000 y a 7.400 millones en el año 2040. Debido a una menor tasa de crecimiento de la población, los bienes de consumo *per cápita*, los alimentos *per cápita* y las expectativas de vida se elevan en forma considerable y se mantienen en un nivel alto durante más tiempo que en el escenario 2. Se requiere menos producción industrial para el consumo y los servicios de una población creciente,

debido a lo cual hay más inversión disponible en el sector de capital. Por lo tanto, la producción industrial total del modelo simulado crece con mayor rapidez y hasta un nivel más alto que en el escenario 2.

Durante cierto tiempo, el promedio de producción industrial por persona excede los 500 dólares anuales —alrededor del doble de 1990—, pero la producción final industrial alcanza su máximo y se colapsa en el mismo tiempo aproximadamente que en el escenario 2, y por las mismas razones. El mayor auge industrial emite más contaminación y utiliza más recursos. La contaminación reduce el rendimiento agrícola. Se debe canalizar inversión hacia la agricultura para mantener en funcionamiento la producción de alimentos. Después del año 2030 también se debe dirigir más capital hacia el sector de recursos no renovables, para encontrar y procesar recursos de depósitos escasos y agotados.

Dados los límites y tecnologías tomadas como supuestos en la simulación del escenario 8, ese mundo no es capaz de sostener 7.400 millones de personas con una producción industrial por persona en constante crecimiento.

Entonces, ¿qué pasaría si el mundo no sólo decidiera moderar su necesidad de niños, sino también las demandas económicas? Por ejemplo, ¿qué pasaría si se pusieran como objetivo un nivel de vida material simple pero adecuado y, al alcanzar ese objetivo, dirigieran su atención a otros objetivos no materiales, alejados del consumismo? Éste también es un cambio hipotético de información, un cambio que no se realiza en el mundo físico, sino en la cabeza de las personas (entendemos que es un cambio enorme). Esto quiere decir que la gente define sus objetivos, establece su posición social, y se propone a sí misma otras metas distintas que la creciente acumulación de riquezas materiales.

El escenario 9 vuelve a representar un mundo simulado con un tamaño de familia deseada de dos niños y un control de natalidad perfecto, y también con una definición de lo que es "suficiente". Este mundo se ha decidido a alcanzar un nivel de producción material *per cápita* de 350 dólares anuales —más o menos el equivalente del de Corea del Sur, o alrededor del doble del nivel de Brasil en 1990. Estas comparaciones no deberían tomarse demasiado literalmente, porque una sociedad en proceso de estabilización como la del modelo será diferente en muchos sentidos de una sociedad en crecimiento con un PIB equivalente al de hoy en día. En cualquier nivel industrial tendrá una fracción mayor de bienes de consumo, porque deberá asignar menos producción económica a la inversión para el crecimiento y menos para defenderse de o compensar un agota-

miento de los recursos o una crisis de contaminación. Si esta sociedad hipotética pudiera también reducir los gastos militares y la corrupción, una economía estabilizada con una producción industrial *per cápita* en torno a los 350 dólares sería equivalente en el confort material al nivel promedio europeo de 1990.

Cuando se alcanza el nivel deseado de producción *per cápita* de la población en el escenario 9, la inversión en el sector de capital ya no es necesaria para crecer, sino sólo para contrarrestar la depreciación. La depreciación es menor, porque la vida media del capital se incrementa en un cuarto en este escenario. La inversión que resulta liberada de esta forma es asignada a los servicios, alimentos o recursos, según las necesidades.

El mundo del escenario 9 logra sostener a 7.300 millones de personas a su nivel de vida deseado durante casi 50 años, desde el 2005 hasta el 2050. La producción de servicios por persona se eleva un 70% por encima de sus valores de 1990; éste podría ser un mundo con un excelente nivel de atención sanitaria para todos. Sin embargo, la producción total de alimentos alcanza su máximo poco después del año 2010, y comienza, a partir de entonces, a caer en forma sistemática a raíz de la contaminación, que se eleva en forma continuada hasta el año 2075. Se requieren sistemáticas inversiones en la mejora de la producción agrícola. Durante cierto tiempo éstas están disponibles. Finalmente, sin embargo, después del 2035, el agotamiento del sector de recursos no renovables también comienza a exigir más capital, y el sector industrial es incapaz de mantenerse.

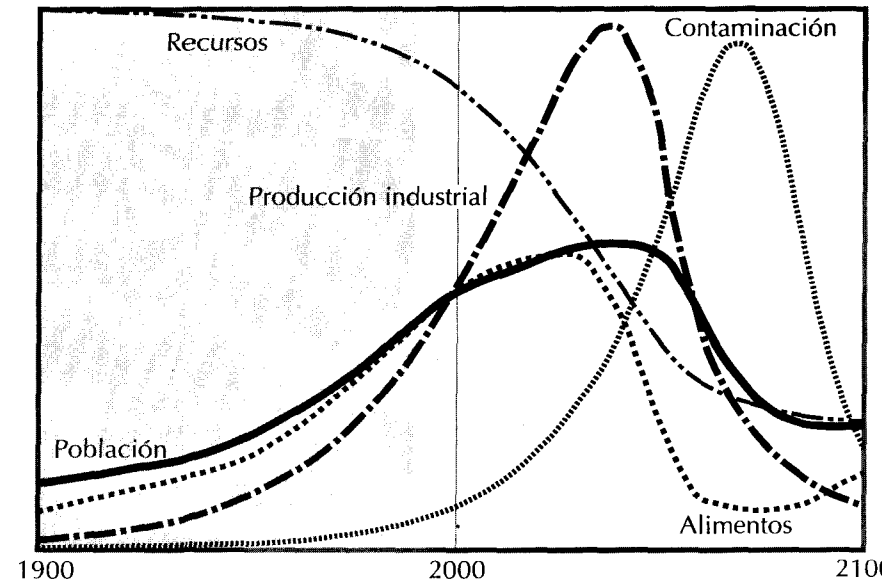
La sociedad simulada en este escenario logra sostener su nivel de vida deseado con respecto a los bienes materiales durante dos generaciones, pero durante ese tiempo su medio ambiente y la provisión de alimentos se deterioran en forma sistemática. Necesita incrementar su política social con mayor poder tecnológico.

Escenario 8 EL MUNDO ADOPTA OBJETIVOS ESTABLES DE POBLACIÓN EN 1995

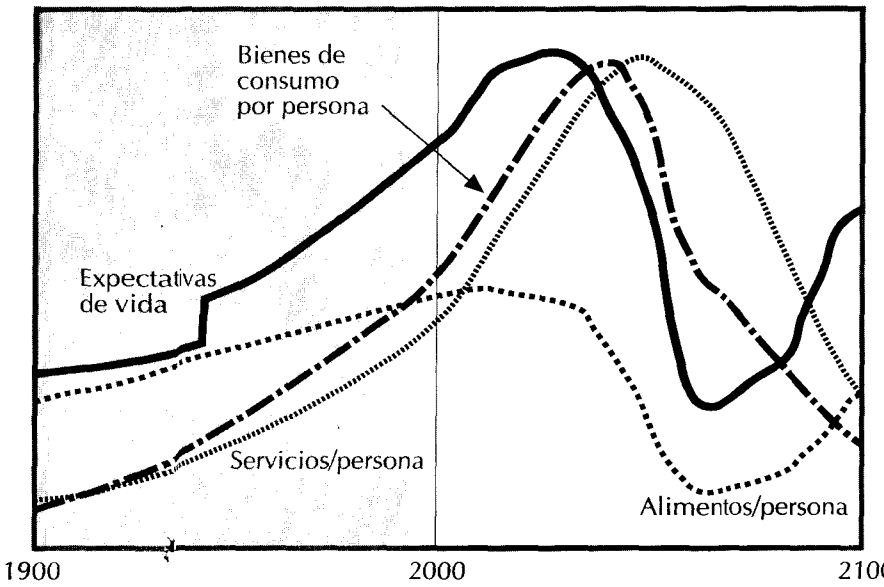
Este escenario da por supuesto que después de 1995 las parejas deciden limitar el tamaño de su familia a dos niños y tienen acceso a tecnologías efectivas de control de la natalidad. Debido a la inercia de la estructura de edad, la población continúa creciendo hasta bien entrado el siglo XXI. El ritmo más lento de crecimiento de la población permite un crecimiento más rápido de la producción industrial, hasta que se detiene por el agotamiento de los recursos y la contaminación creciente.

ESCENARIO 8

Estado del mundo



Nivel material de vida



En el escenario 10, el modelo del mundo toma otra vez la decisión de un tamaño promedio de la familia de dos descendientes a partir de 1995, tiene una eficacia total en el control de la natalidad y aspira a un objetivo de producción industrial per *cápita* de 350 dólares, al igual que en el modelo anterior. Por añadidura, a partir de 1995, comienza a utilizar las mismas tecnologías que fueron probadas en el capítulo 6. Estas tecnologías mejoran la eficiencia de la utilización de recursos, reducen las emisiones de contaminación por unidad de producción industrial, controlan la erosión de la tierra, e incrementan el rendimiento de la tierra hasta que los alimentos *per cápita* alcanzan el nivel deseado.

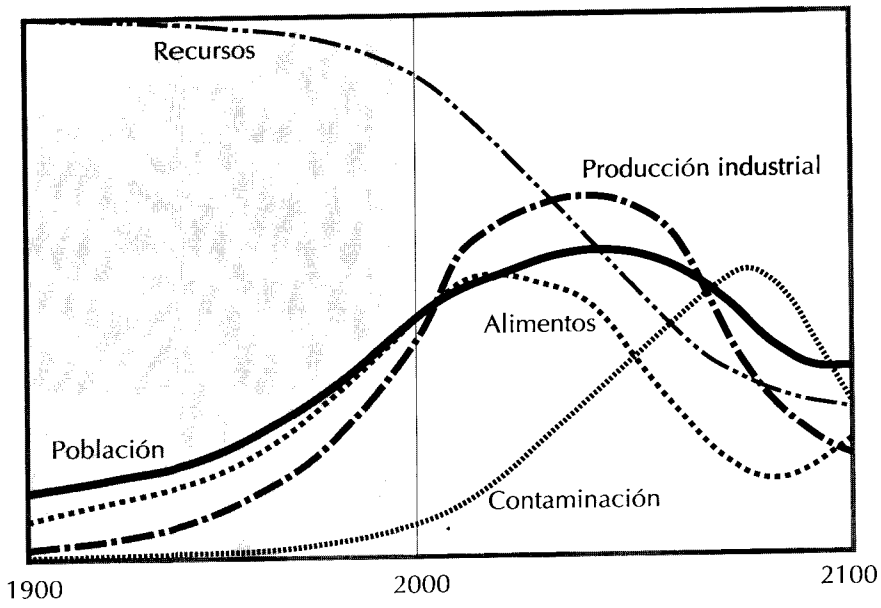
En el escenario 10 asumimos, tal como hicimos en el capítulo 6, que estas tecnologías sólo aparecen cuando se las necesita, suponen un retraso de implantación a nivel mundial de veinte años y tienen un coste de capital. En las simulaciones del capítulo 6 no existía suficiente capital para mantener las tecnologías en funcionamiento mientras se hacía frente a las diversas crisis suscitadas en la sociedad en rápido crecimiento. En la más restrictiva sociedad del escenario 10, donde el capital no necesita ser derivado hacia un mayor crecimiento o hacia una mejoría del cúmulo creciente de problemas interactuantes, las nuevas tecnologías pueden ser plenamente soportadas. Operando en forma sostenida durante un siglo, reducen el uso de los recursos no renovables por unidad de producto industrial en un 80% y la contaminación emitida por unidad de producto en un 90%. El lento crecimiento del rendimiento de la tierra sufre una pausa a principios del siglo XXI a medida que la contaminación sube (un efecto retardado de la contaminación emitida en torno al final del siglo XX),

Escenario 9 EL MUNDO ADOPTA OBJETIVOS ESTABLES DE POBLACIÓN Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL EN 1995

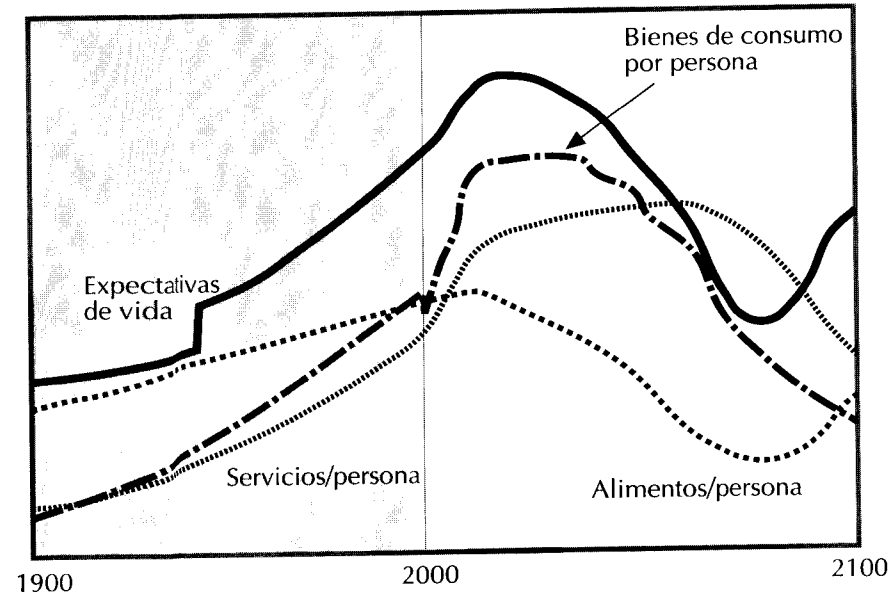
Si la población adopta un tamaño deseado de familia de dos descendientes y un objetivo deliberadamente moderado para la producción industrial *per cápita*, puede mantenerse a sí mismo en un nivel material de vida un 50% más alto que el promedio mundial de 1990 durante unos 50 años. La contaminación continúa aumentando, no obstante, sometiendo a tensión a la tierra productiva. La producción de alimentos por persona decrece, reduciendo eventualmente la expectativa de vida y la población.

ESCENARIO 9

Estado del mundo



Nivel material de vida



pero para el año 2040 la contaminación comienza a descender nuevamente. El rendimiento de la tierra se recupera y se eleva lentamente durante el resto del siglo.

En el escenario 10 la población se nivela escasamente por debajo de los 8.000 millones y goza del deseado nivel de vida material durante casi un siglo. Después del 2010 su expectativa promedio de vida se mantiene apenas por encima de los 80 años, sus servicios por persona se elevan un 210% por encima del nivel de 1990, y hay suficiente alimento para todos. La contaminación alcanza su máximo y comienza a caer antes de causar daños irreversibles. Los recursos no renovables se extinguen con tal lentitud que la mitad del *stock* inicial se encuentra presente en el año 2100.

La sociedad del escenario 10 logra reducir el peso total sobre el medio ambiente a partir del año 2040. La tasa de extracción de recursos no renovables cae después del año 2010. La erosión de la tierra se corta abruptamente después del 2040. La generación de contaminantes persistentes alcanza su máximo en el 2015. El sistema logra colocarse por debajo de sus límites, evita un colapso descontrolado, mantiene su nivel de vida y se sostiene casi, pero no del todo, en equilibrio.

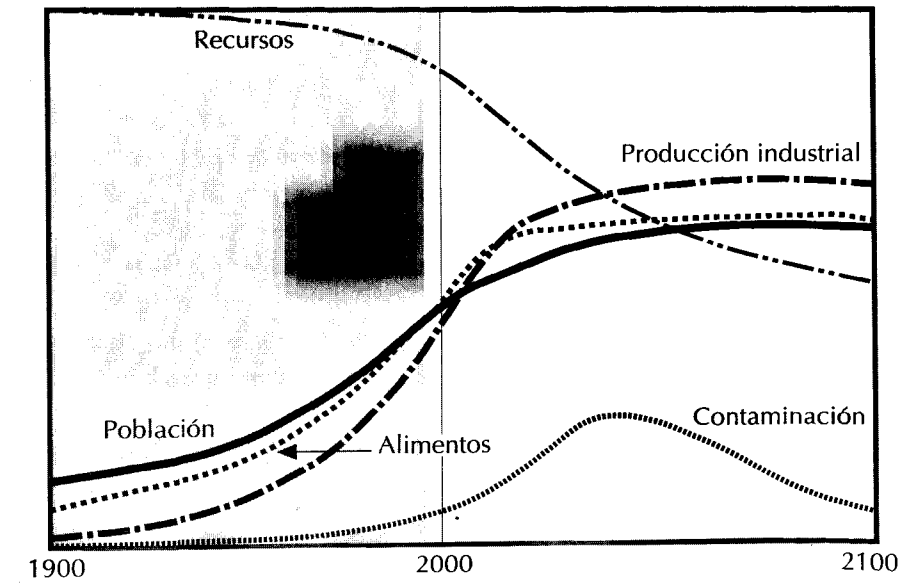
La palabra *equilibrio* en el lenguaje de sistemas significa que los ciclos positivos y negativos están equilibrados y que los grandes *stocks* del sistema —en este caso la población, el capital, la tierra, la fertilidad del suelo, los recursos no renovables y la contaminación— se mantienen relativamente estables. No quiere decir necesariamente que la población y la economía se han quedado estáticas o estancadas. Se mantienen constantes a grandes rasgos, de igual forma que un río puede mantenerse constante, pese a que por él fluye siempre agua nueva. En una sociedad en equilibrio

Escenario 10 POBLACIÓN E INDUSTRIA ESTABILIZADAS CON TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES, LA EROSIÓN Y EL USO DE RECURSOS, ADOPTADAS EN 1995

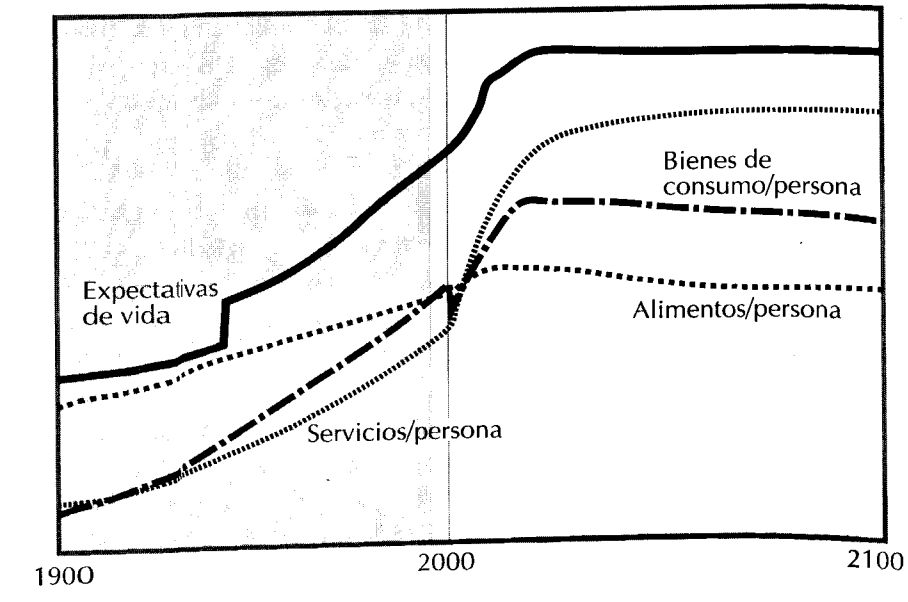
En este escenario la población y la producción industrial por persona son moderadas como en el modelo anterior, y por añadidura se desarrollan tecnologías para conservar recursos, proteger la tierra agrícola, incrementar el rendimiento del suelo y reducir la contaminación. La sociedad resultante sostiene 7.700 millones de personas en un nivel de vida confortable con altas expectativas de vida y contaminación decreciente, por lo menos hasta el año 2100.

ESCENARIO 10

Estado del mundo



Nivel material de vida



como la del escenario 10, la gente nace mientras otros mueren; nuevas fábricas, carreteras, edificaciones, máquinas, son construidas mientras las viejas se destruyen (y reciclan). Las tecnologías mejoran, y el flujo constante de producción por persona estaría casi con seguridad variando y diversificándose en contenido.

Al igual que un río puede tener flujos y reflujos respecto a un caudal promedio, así variaría la sociedad en equilibrio, ya sea por elección deliberada de la humanidad o por oportunidades imprevisibles o desastres. Como un río, cuando su carga de contaminación disminuye, se puede purificar a sí mismo y soportar comunidades fluviales más ricas y variadas, de la misma forma una sociedad sostenible se puede purificar a sí misma de la contaminación, adquirir nuevos conocimientos, hacer sus procesos productivos más eficientes, desplazar tecnologías, mejorar su propia gestión, hacer la distribución más equitativa y diversificarse. Pensamos que es probable que haga todas esas cosas, cuando las tensiones del crecimiento se hayan aliviado.

La sociedad sostenible que se muestra en el escenario 10 es la que entendemos que el mundo podría alcanzar, dado el conocimiento sobre los sistemas planetarios que está a nuestra disposición. Tiene 7.700 millones de habitantes, suficiente comida, bienes de consumo y servicios como para soportarlos a todos en un nivel de confort material. Gasta un esfuerzo considerable y emplea permanentemente una tecnología de afinación creciente para proteger el suelo, reducir la contaminación y utilizar sus recursos no renovables con un alto grado de eficiencia. Dado que su crecimiento se reduce y eventualmente se detiene, sus problemas son gestionables y de hecho se gestionan.

Pensamos que ése es un retrato no sólo de un mundo posible, sino de uno deseable, ciertamente más deseable que los mundos simulados del capítulo precedente, que siguen creciendo hasta que se detienen por crisis múltiples. El escenario 10 no es el único desenlace sostenible que puede arrojar el modelo World3. Dentro de los límites del sistema hay variaciones y elecciones. Podría haber más alimentos y menos producción industrial, o a la inversa, más gente viviendo con un menor caudal de bienes industriales o menos gente viviendo con más. Una transición como la descrita en el escenario 10 podría llevar a la sociedad mundial más tiempo que el supuesto —pero eso tendría sus costes.

Demorar la transición hacia un mundo sostenible ya ha tenido sus costes.

La diferencia que pueden representar 20 años

En los siguientes dos ensayos nos preguntamos: ¿Qué ocurriría si el mundo hubiese adoptado las políticas de sostenibilidad mostradas en el escenario 10 (un tamaño de familia deseada de dos descendientes, una producción industrial deseada de 350 dólares por persona, además de tecnologías de eficiencia de recursos y control de la contaminación) no en 1995 sino en 1975? ¿Qué pasaría si en lugar de hacerlo en 1995 lo posterga hasta el 2015? ¿Qué efecto tiene una diferencia de veinte años más o en menos?

El escenario 11 es exactamente igual al escenario 10, con la salvedad de que los cambios de política no se aplican en 1995 sino en 1975. Las diferencias entre este mundo y el del escenario anterior son sutiles. La entrada en el reino de la sostenibilidad con veinte años de anticipación ha producido un mundo más seguro y más rico, pero no es un mundo cualitativamente distinto. La población se nivela en torno a los 5.700 millones de personas en lugar de los 8.000 millones. La contaminación alcanza su máximo y comienza a caer a niveles inferiores y quince años antes, e interfiere mucho menos en el rendimiento de las cosechas que en el escenario 10. La expectativa de vida sobrepasa los 80 años y se mantiene alta. Hay más recursos no renovables disponibles para finales del siglo XXI, y cuesta menos esfuerzos encontrarlos y extraerlos.

La población del escenario 11 alcanza su nivel deseado de producción industrial por persona antes, y es capaz de mantenerlo y soportar sus tecnologías en mejoría permanente sin problemas. Esta sociedad tiene un medio ambiente más placentero, más recursos, mayor grado de libertad; está más lejos de sus límites, menos al filo que la sociedad del escenario 10.

Eso fue hace veinte años, un futuro que podría haber estado al alcance de la mano pero que ya no lo está.

Un retraso de veinte años supone una gran diferencia, como se podría esperar, conociendo las matemáticas del crecimiento exponencial. En el escenario 12 realizamos en el World3 las mismas políticas de sostenibilidad pero no en 1975, ni en 1995, sino en el 2015. Para entonces es demasiado tarde como para evitar algunas pesadas turbulencias.

La población simulada del escenario 12 alcanza los 8.700 millones. Pese a que se fija como objetivo el mismo nivel de vida, para una población mayor en casi 1.000 millones, la producción industrial debe elevarse más de lo que lo ha hecho en el escenario 10. La actividad industrial añadida, además del retraso de veinte años en implantar las tecnologías de control de la

contaminación, comporta una crisis de contaminación, pese a que las tecnologías de control de la contaminación evolucionan de la misma forma que lo han hecho en el escenario 11. La contaminación reduce el rendimiento del suelo, cae la producción de alimentos *per cápita*, caen las expectativas de vida, y también decrece la población hasta los 7.400 millones.

Con la población más pequeña y las tecnologías en permanente mejoría (puede que no sea un supuesto "realista" esta mejora permanente, teniendo en cuenta la declinación económica en este modelo del mundo), el mundo del escenario 12 eventualmente se recupera. Después del 2055 la contaminación comienza a descender, se reanima la producción de alimentos, la expectativa de vida vuelve a elevarse. Se ha necesitado, no obstante, tal volumen de inversión de capital para corregir el *sobrepasamiento*, que no es suficiente lo que está disponible para sostener el deseado nivel material de vida. La producción industrial *per cápita* alcanza su máximo con 350 dólares por persona al año alrededor del año 2025 y cae luego en forma suave hasta alcanzar la mitad de ese nivel. El retraso de veinte años en moverse en dirección a la sostenibilidad ha reducido en gran medida el equilibrio del nivel de vida que este mundo simulado puede mantener.

¿Qué altura es demasiada altura?

El escenario 12 muestra qué es lo que ocurre si el modelo de sociedad espera para hacer su transición hacia la sostenibilidad. El escenario 13 muestra qué ocurre si apunta un poco alto.

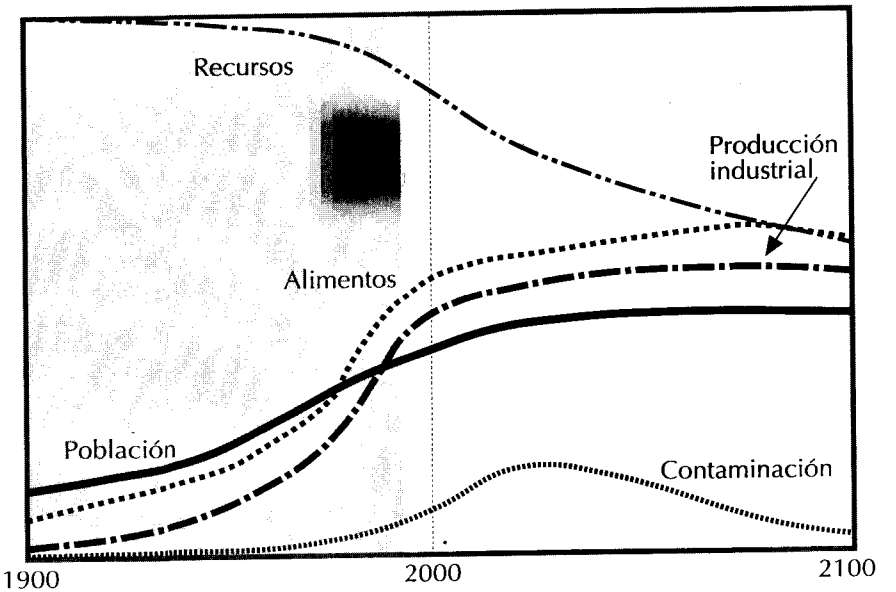
El escenario 13 es directamente comparable al escenario 10 en que este mundo también comienza a moderar su población y economía en 1995 y desarrolla las mismas tecnologías para la conservación de recursos y control de la contaminación. Esta vez, no obstante, el objetivo del modelo mundial

Escenario 11 POBLACIÓN E INDUSTRIA ESTABILIZADAS CON TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES, LA EROSIÓN Y EL USO DE LOS RECURSOS, ADOPTADAS EN 1975

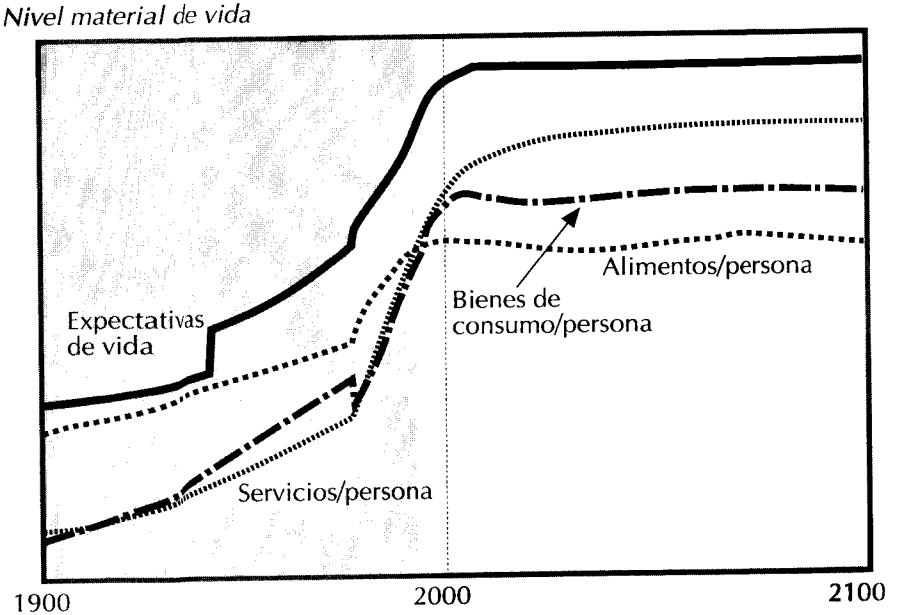
Esta simulación incluye todos los cambios que fueron incorporados en el escenario anterior, pero las políticas de sostenibilidad se implantan en el año 1975 en lugar de en 1995. Adoptar medidas de sostenibilidad veinte años antes hubiera significado una población global considerablemente inferior, menos contaminación, más recursos renovables y un nivel material de vida levemente superior.

ESCENARIO 11

Estado del mundo



Nivel material de vida



para la alimentación por persona se establece en un 50% más y el objetivo de producción industrial *per cápita* es 700 dólares en lugar de 350, 2,5 veces más que el nivel de 1990. Ocurre que esta combinación de objetivos no se puede sostener para una población de cerca de 8.000 millones de personas.

La producción industrial por persona jamás alcanza su objetivo. Alcanza su máximo un poco por debajo de los 500 dólares después del año 2035 y comienza a decaer lentamente después. La cantidad de alimentos por persona alcanza su objetivo en torno al año 2065, pero después también comienza a declinar. Es necesaria demasiada tecnología, demasiado capital se destina a contrarrestar los daños al medio ambiente y a obtener los altos objetivos materiales. Para el año simulado 2100 los flujos *per cápita* de comida y bienes industriales disponibles para este mundo más ambicioso están cayendo a niveles más bajos que lo que estaban en el mundo del escenario 10, que estaba satisfecho con fijarse objetivos más moderados.

Podríamos preguntarnos si este ensayo da estimaciones fiables sobre un nivel de vida que sería en realidad demasiado alto para que un "mundo real" de 8.000 millones de personas pudiera sostenerlo.

No. Definitivamente no. Las cifras no son tan exactas. Es posible que realmente pueda mantenerse a más gente con un nivel de vida incluso más alto. También podría ocurrir, dados los supuestos optimistas de World3 sobre la ausencia de guerras, conflictos, corrupción y errores, que el escenario 12 sea optimista en exceso. World3 no puede ser utilizado para afinar un mundo humano que pretende encontrar sus límites superiores con exactitud. Ningún modelo disponible en la actualidad, y probablemente ningún modelo que jamás pueda desarrollarse, permitirá ese tipo de decisión numérica.

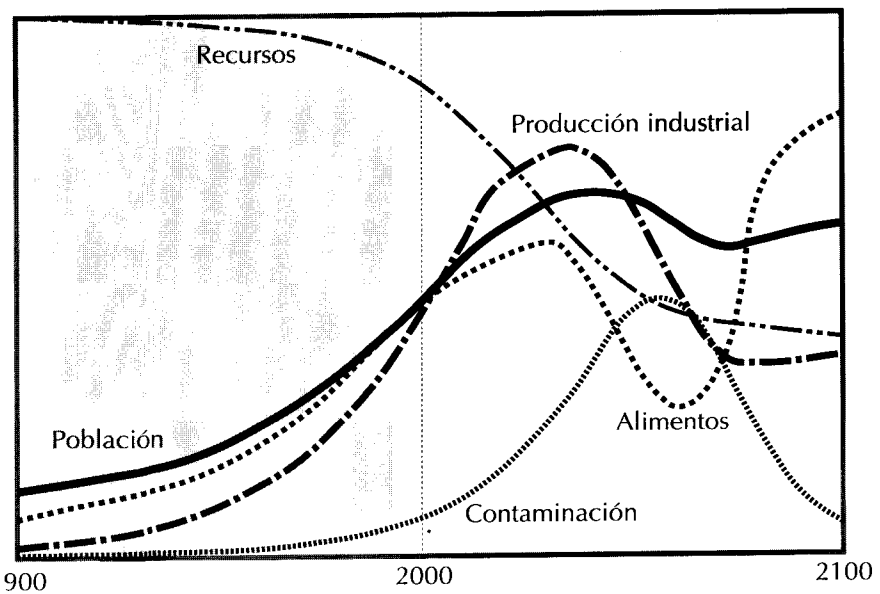
Las lecciones que se pueden sacar del World3 son cualitativas, no cuantitativas. No detallan con exactitud una predicción acerca del futuro o un plan detallado para el mundo. Pero los ensayos que se muestran en este capítulo sugieren conclusiones generales que no son totalmente reco-

Escenario 12 POBLACIÓN E INDUSTRIAS ESTABILIZADAS CON TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES, LA EROSIÓN Y EL USO DE RECURSOS, ADOPTADAS EN EL 2015

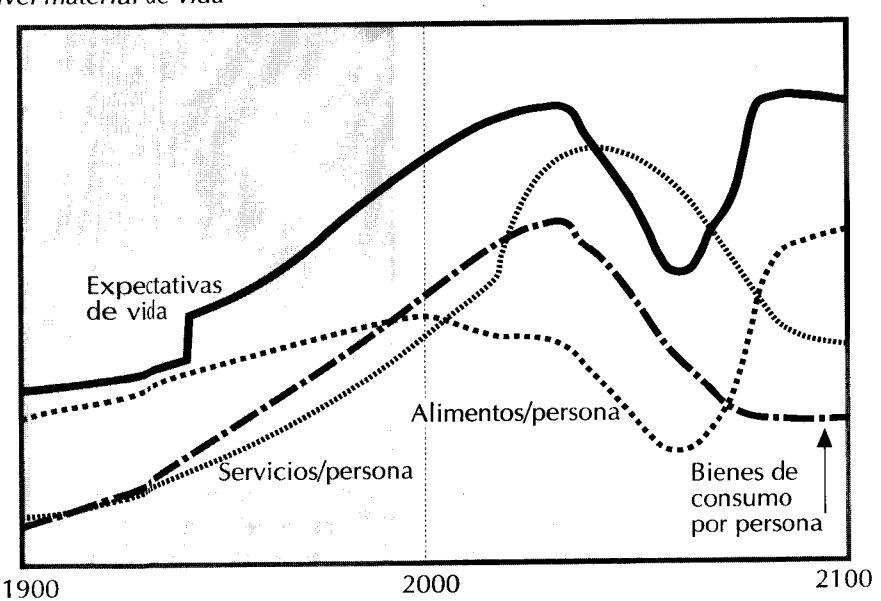
Si se espera para implantar las políticas de sostenibilidad hasta el año 2015, se admite un incremento excesivo de la población, industria y contaminación. Incluso las eficaces tecnologías que operan en este escenario no logran contrarrestar una caída, pese a que logran revertir la declinación a finales del siglo XXI.

ESCENARIO 12

Estado del mundo



Nivel material de vida



nocidas en el discurso público global, y que son de importancia vital para las decisiones que se toman (y las que no se toman) cada día. Imaginen cuán diferente sería el comportamiento del sistema mundial si las siguientes conclusiones fueran ampliamente conocidas y aceptadas:

- La transición hacia una sociedad sostenible es probablemente posible sin reducciones en la población o en la producción industrial.

- Una transición hacia la sostenibilidad requeriría, no obstante, tanto restricciones sociales deliberadas sobre la población futura y el crecimiento industrial como significativas mejorías en la eficiencia técnica utilizada en la explotación de los recursos de la tierra.

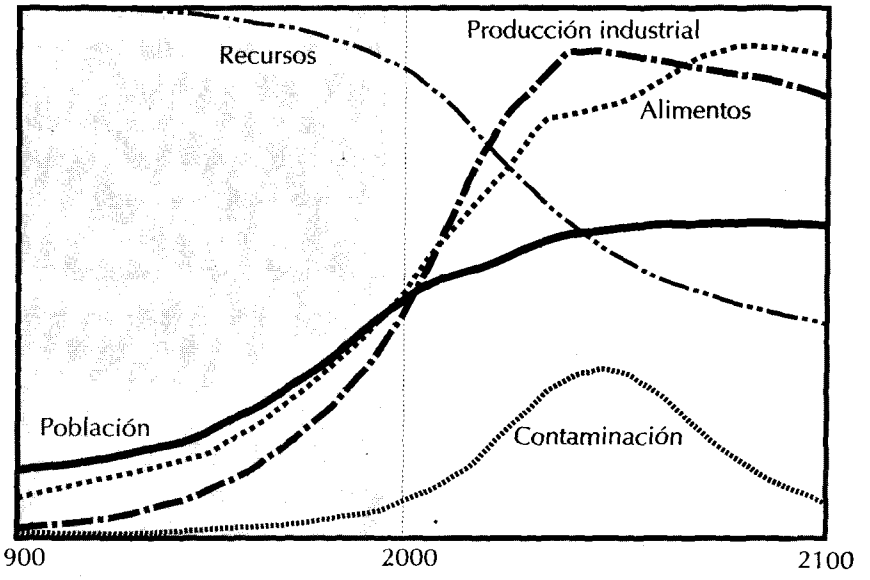
- Hay muchas formas en las que una sociedad sostenible puede estructurarse, muchas elecciones sobre la cantidad de habitantes, nivel de vida, inversiones tecnológicas, y asignaciones entre diversos bienes industriales, servicios, alimentos y otras necesidades materiales.

- A medida que se acercan los límites de la tierra, y especialmente cuando se los sobrepasa, existen relaciones recíprocas inevitables entre la cantidad de gente que la tierra puede soportar y el nivel de vida material en que cada persona puede ser sostenida. Las cifras exactas de esa influencia recíproca no pueden saberse, y cambiarán en el tiempo a medida que la tecnología, conocimiento, capacidad de respuesta humana y el sistema de soporte de la tierra se modifiquen. La población que puede ser mantenida y su nivel de vida pueden moverse hacia arriba o hacia abajo. Pero las consecuencias generales de las relaciones recíprocas seguirán siendo las mismas: muchas personas suponen menos producto global por persona —o un mayor riesgo de colapso.

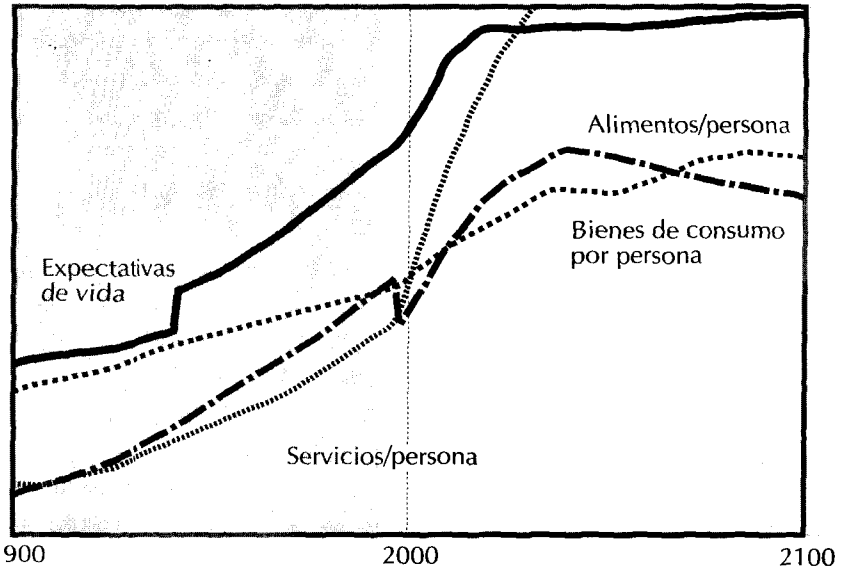
Escenario 13 POLÍTICAS DE EQUILIBRIO PERO CON OBJETIVOS MÁS ALTOS DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y DE ALIMENTOS

Usando las mismas políticas generales que se realizaron en el escenario 11, pero con demandas mucho mayores para alimentos y consumo, ejerce mucha mayor presión sobre la base global de recursos. Inicialmente los niveles de vida son altos, pero para el año 2100 el mundo simulado muestra claros signos de insostenibilidad.

Estado del mundo



Nivel material de la vida



- Cuanto más tarde la economía mundial en reducir sus insumos totales para moverse en el sentido de la sostenibilidad, menor será la población y su nivel material de vida soportable en última instancia. En algún momento, los retrasos pueden suponer el colapso.

- Cuanto más altos ponga la sociedad sus objetivos de nivel material de vida, mayores los riesgos de excederse y erosionar el sistema.

De acuerdo con nuestro modelo de ordenador, nuestros modelos mentales, nuestro conocimiento de los datos y nuestra experiencia acerca del "mundo real", no hay tiempo que perder para ajustar los niveles por debajo de los límites y estructurar un sistema de información orientado hacia la sostenibilidad. Si se elimina la reducción de insumos globales y la transición hacia la sostenibilidad, en el mejor de los casos se disminuyen las opciones de las generaciones futuras, en el peor de los casos se precipitará el colapso.

No hay tiempo que perder, como tampoco hay razona alguna para perderlo. La sostenibilidad es una nueva idea para mucha gente. Puede que sea difícil entenderla. Pero a lo ancho de todo el mundo hay personas que han entrado en el ejercicio de imaginar un mundo sostenible. Lo pueden ver como un mundo hacia el cual no es necesario moverse con reticencias, ni con un sentimiento de sacrificio o lamentaciones, sino con alegría. Podría ser un mundo mucho mejor que éste en el que vivimos.

La sociedad sostenible

Hay muchas formas de definir la sostenibilidad. La definición más simple es: Una sociedad sostenible es aquella que puede persistir a través de generaciones, que es capaz de mirar hacia el futuro con la suficiente flexibilidad y sabiduría como para no minar su sistema físico o social de apoyo.

La Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo concretó esa definición con palabras memorables: una sociedad sostenible es aquella que "atiende las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para hacerse cargo de sus propias necesidades"[118].

Desde un punto de vista de sistemas, una sociedad sostenible es aquella que tiene en marcha mecanismos de información, sociales e institucionales, para mantener bajo control los bucles de retroalimentación positivos que generan el crecimiento exponencial de la población y el capital. Eso quiere decir que las tasas de natalidad igualen a grandes rasgos las de mortandad, que las inversiones de capital reemplacen con equidad su desgaste, a menos o hasta que los cambios técnicos y las decisiones sociales justifiquen un cambio debatido y controlado en los niveles de población o capital. Para que sea socialmente sostenible, la combinación de población, capital y tecnología en la sociedad debe ser configurada de forma tal que el nivel material de vida sea adecuado y seguro para cada uno. Para que sea físicamente sostenible, los insumos globales materiales y energéticos de una sociedad deben cumplir con las tres condiciones puestas por el economista Herman Daly[119]:

- Que sus tasas de utilización de recursos no excedan sus tasas de regeneración.

- Que sus tasas de utilización de recursos no renovables no exceden la tasa a la cual los sustitutos renovables se desarrollan.

- Que sus tasas de emisión de agentes contaminantes no excedan la capacidad de asimilación del medio ambiente.

Cualquiera que sea la fisonomía detallada de dicha sociedad, difícilmente podría ser demasiado diferente de aquella en la que vivimos actualmente. La imaginación colectiva de la humanidad está fuertemente impresionada por su reciente experiencia de pobreza de un lado o de rápido crecimiento material del otro, y de los esfuerzos obstinados en mantener ese crecimiento a cualquier coste. Por lo tanto, muchos modelos mentales están demasiado imbuidos de la noción de crecimiento como para permitir imaginar una sociedad sostenible. Antes de proceder a desarrollar qué podría ser la sostenibilidad, podemos definir aquello que no debe ser.

La sostenibilidad no supone la ausencia de crecimiento. Una sociedad fijada al crecimiento perpetuo tiende a escuchar cualquier crítica al crecimiento como una negación total. Pero tal como señaló Aurelio Peccei,

fundador del Club de Roma, esa reacción simplemente sustituye una simplificación extrema por otra:

> Todos aquellos que han colaborado en hacer tambalear el mito del crecimiento... fueron ridiculizados y ajusticiados en la horca, metafóricamente hablando, arrastrados y descuartizados por los leales defensores de la vaca sagrada del crecimiento. Algunos de ellos... acusan al informe (*Los límites del crecimiento*)... de defender el CRECIMIENTO CERO. Claramente, dicha gente no ha comprendido nada, ni sobre el Club de Roma ni sobre el crecimiento. La noción de crecimiento cero es tan primitiva —como, a tal efecto, lo es la de crecimiento infinito— y tan imprecisa, que es un sinsentido conceptual hablar de ella dentro de una sociedad viva, dinámica[120].

Una sociedad sostenible estaría interesada en el desarrollo cualitativo, no en la expansión física. Utilizaría el crecimiento material como una herramienta considerada, y no como un mandato perpetuo. No estaría ni en contra ni a favor del crecimiento, más bien comenzaría a discriminar entre distintos tipos de crecimiento y objetivos de crecimiento. Antes de que esta sociedad optara por cualquier propuesta específica de crecimiento, se preguntaría para qué es ese crecimiento, quién se beneficiaría con él, cuánto costaría, cuánto duraría, si podría ser encajado por las fuentes y sumideros del planeta. Una sociedad sostenible aplicaría sus adquisiciones y su mejor conocimiento de los límites de la tierra para elegir solamente el tipo de crecimiento que sirviera en realidad a los objetivos sociales, reforzando la sostenibilidad. Y cuando cualquier crecimiento físico hubiera cumplido con sus objetivos, sería detenido.

Una sociedad sostenible no congelaría eternamente las actuales fórmulas de desigualdad en la distribución. Con certeza, no permitiría la perduración de la pobreza. Mantenerla no sería sostenible por dos razones. En primer lugar, los pobres no lo soportarían, ni tendrían por qué soportarlo. En segundo lugar, mantener a parte de la población en la pobreza no podría, a menos que fuera bajo mera coerción, permitir que se estabilice la población. Tanto por razones morales como prácticas, cualquier sociedad sostenible debe aportar seguridad y suficiencia material para todos. Para alcanzar la sostenibilidad desde este punto, el restante posible crecimiento material —cualquiera que sea la amplitud disponible para una mayor utilización de los recursos y emisiones contaminantes, además

de cualquier nuevo margen que sea añadido por mayor eficacia y moderación en el estilo de vida de los ricos— será lógicamente asignado a aquellos que más lo necesitan.

Un estado sostenible no sería la sociedad de desaliento y estancamiento, alto desempleo, crisis y bancarrota que sufren los actuales sistemas de mercado cuando su crecimiento se interrumpe. La diferencia entre una sociedad sostenible y la recesión económica tal cual la conocemos actualmente es como la diferencia entre detener un automóvil adrede con los frenos y parar chocando contra una pared de ladrillos. Cuando la economía actual sobrepasa sus límites, retrocede en forma demasiado rápida e inesperada como para que las personas o las empresas se reeduquen, reasignen y reajusten. Una transición hacia la sostenibilidad podría desarrollarse lo suficientemente despacio y con suficiente conocimiento previo como para que las personas y las empresas puedan encontrar su sitio apropiado en la nueva sociedad.

No hay ninguna razón para que una sociedad sostenible deba ser cultural o técnicamente primitiva. Liberada tanto de la ansiedad como de la gula material, la sociedad humana tendría enormes posibilidades para la expansión de la creatividad humana en direcciones constructivas. Sin los altos costes del crecimiento, tanto para la sociedad humana como para el medio ambiente, tanto la tecnología como la cultura podrían florecer. John Stuart Mill, uno de los primeros (y últimos) economistas en tomarse en serio la idea de una economía consistente con respecto a los límites de la tierra, vio que aquello que denominó "estado estacionario" podría sostener a una sociedad en permanente evolución y mejora. Hace más de cien años escribió:

> No puedo... contemplar el estado estacionario del capital y la riqueza con la profunda aversión con la que se manifiestan respecto a ellos los economistas políticos de la vieja escuela. Me inclino a creer que sería, en su conjunto, una considerable mejoría respecto a nuestra condición actual. Confieso que no me siento seducido por el ideal de vida sostenido por aquellos que piensan que el estado normal de los seres humanos es el de luchar para mantenerse; que pisotearse, aplastarse, pegarse con el codo y pisar los talones a los demás... sean el flanco más deseable de la humanidad... Hay poca necesidad de subrayar que una condición estacionaria del capital y la población no implica un estado estacionario de la mejora de la humanidad. Habría tanta amplitud

como siempre para todo tipo de cultivo de la mente y progreso social y moral; tanto como para mejorar el Arte de Vivir, y mucha más probabilidad de que éste sea mejorado[121].

Un mundo sostenible no podría ni debería ser un mundo rígido, con su producción o población, ni ninguna otra cosa, mantenida en forma patológicamente constante. Uno de los supuestos más extraños de los modelos mentales actuales es la idea muy difundida de que un mundo de moderación será un mundo de control gubernamental estricto y centralizado. No creemos que dicho tipo de control sea posible, deseable o necesario. Un mundo sostenible requeriría reglas, leyes, niveles, fronteras y acuerdos sociales, desde luego, como lo necesita cualquier cultura humana. Algunas de las reglas de la sostenibilidad serán diferentes de las reglas que algunas personas están habituadas a ver y conocer. Algunos de los controles necesarios ya existen, como, por ejemplo, el acuerdo internacional sobre el ozono.

Pero las reglas de sostenibilidad, como cualquier regla social que puede estructurarse, no eliminarán las libertades importantes; las crearán o las protegerán de aquellos que pretendan destruirlas. La prohibición del atraco de bancos inhibe la libertad del ladrón de bancos con el objetivo de asegurar a todos libertad para depositar o retirar su dinero con seguridad. La prohibición del uso excesivo de un recurso o de la generación de contaminantes sirve a objetivos similares.

No requiere demasiada imaginación presentar un conjunto mínimo de estructuras sociales —bucles retroalimentados que aportan nueva información sobre costes, consecuencias y sanciones— que mantendrían a una sociedad en condiciones de sostenibilidad, permitirían la evolución, las fluctuaciones, la creatividad y el cambio, y admitirían muchas más libertades que las que jamás serían posibles en un mundo que continúa atiborrándose de población más allá de sus límites.

Algunas personas creen que una sociedad sostenible debería dejar de utilizar recursos no renovables, ya que su utilización es insostenible por definición. Esa idea es una interpretación excesivamente rígida de lo que significa que algo sea sostenible. Ciertamente, una sociedad sostenible utilizaría los dones de la corteza terrestre con mayor eficacia y meticulosidad que el mundo contemporáneo. Les aplicaría un precio correcto y habría más disponible para las generaciones futuras. Pero no hay razón para no usarlos, mientras su uso siga el criterio de sostenibilidad ya definido, especialmente si se desarrollan sustitutos renovables para que ninguna sociedad futura se encuentre construida alrededor de la utilización de un recurso que repentinamente deje de estar disponible o a cuya extracción ya no se pueda hacer frente.

Tampoco hay razón alguna para que una sociedad sostenible sea uniforme. La diversidad es al mismo tiempo causa y resultado de la sostenibilidad en la naturaleza, y también lo sería en la sociedad humana. La mayor parte de la gente tiene una visión del mundo sostenible como descentralizado, con condiciones límites que mantienen cada región al margen de amenazas hacia las demás o de la tierra en su conjunto. La variedad cultural y la autonomía local podrían ser mayores, no menores, en un mundo semejante.

No hay motivo alguno para que una sociedad sostenible no sea democrática, sea aburrida o carezca de retos. Algunos juegos que en la actualidad divierten y consumen las personas, tales como la carrera armamentista y la acumulación de cantidades ilimitadas de riqueza, dejarían de ser jugados. Pero de todas formas seguiría habiendo juegos, retos, problemas que resolver, formas en las cuales la gente deberá probarse a sí misma, servir uno al otro, poner en juego sus habilidades, y vivir una buena vida, quizá más satisfactoria que cualquiera de las que se puedan vivir hoy en día.

Eso fue una larga lista de lo que no es una sociedad sostenible. En el proceso de detallarla, también por contraste, hemos indicado lo que pensamos que podría ser una sociedad sostenible. Pero los detalles de tal sociedad no podrán ser elaborados por un puñado de modelistas informáticos; requerirá las ideas, visión y talento de miles de millones de personas.

Del análisis estructural del sistema mundial que hemos descrito en este libro, sólo podemos contribuir con un simple conjunto de orientaciones generales para restructurar el sistema mundial hacia la sostenibilidad. Damos más adelante una lista de estas orientaciones. Cada una puede ser probada en cientos de formas específicas a todos los niveles, desde la vivienda familiar hasta las comunidades y las naciones o incluso el mundo en su conjunto. Otras personas verán mejor que nosotros cómo implantar esos cambios en sus propias vidas, culturas y sistemas políticos. Cualquier paso en cualquiera de estas direcciones es un paso hacia la sostenibilidad.

- *Mejorar las señales.* Conocer mejor y controlar el bienestar de la población humana y la condición de las fuentes y sumideros locales y planetarios. Informar a los gobiernos y al público de forma continuada y rápida

sobre las condiciones del medio ambiente y las condiciones económicas. Incluir los verdaderos costes ambientales en los precios económicos; reformular los indicadores económicos como el PIB de forma tal que no confundan los costes con los beneficios, o el producto global con el bienestar, o la depreciación del capital natural con los ingresos[122].

- *Acelerar los tiempos de respuesta.* Controlar activamente las señales que indican cuándo el medio ambiente soporta una sobrecarga. Decidir por adelantado qué hacer si aparecen problemas (si es posible, preverlos antes de que aparezcan) y tener dispuestas las herramientas institucionales y técnicas necesarias para actuar con eficacia. Educar para la flexibilidad y creatividad, para el pensamiento crítico y la habilidad de rediseñar tanto los sistemas físicos como los sociales. Los modelos de ordenador pueden ayudar en este plano, pero más importante sería que la educación general introdujera el pensamiento sobre los sistemas.

- *Minimizar el uso de los combustibles no renovables.* Los combustibles fósiles, las aguas fósiles subterráneas y los minerales deberían utilizarse sólo con la mayor eficacia posible, reciclados cuando se pueda (los fósiles no pueden reciclarse, pero los minerales y el agua sí), y consumidos sólo como parte de una transición deliberada hacia los recursos renovables.

- *Prevenir la erosión de los recursos renovables.* La productividad de los suelos, de las aguas de superficie, de las aguas subterráneas renovables, y de todos los seres vivientes, incluidos los bosques, peces y fauna salvaje, deben ser protegidos y, en la medida de lo posible, restablecidos y potenciados. Estos recursos sólo deberían ser explotados al mismo ritmo en que se pueden regenerar. Eso requiere información acerca de sus tasas de regeneración, y fuertes sanciones sociales o incentivos económicos contra su uso excesivo.

- *Usar todas las fuentes con una eficacia máxima.* Cuanto más bienestar humano se pueda obtener con menos insumos globales, mejor puede ser la calidad de vida mientras se mantenga por debajo de los límites. La materialización de grandes incrementos en la eficacia es técnicamente posible y económicamente deseable. Una mayor eficiencia será esencial, si se pretende que la población mundial actual y futura sean soportadas sin provocar un colapso.

- *Desacelerar y eventualmente detener el crecimiento exponencial de la población y del capital físico.* Hay límites reales a la extensión en la que los cinco primeros puntos de esta lista pueden ser alcanzados. Por lo tanto esta lista es esencial. Involucra cambios institucionales y de filosofía, e innovaciones sociales. Requiere definir niveles de población y de producción industrial que son deseables y sostenibles. Exige objetivos definidos en torno a la idea de desarrollo más que a la de crecimiento. Reclama, simple pero profundamente, una visión de los objetivos de la existencia humana que no requiera una expansión física constante.

Podemos extendernos sobre este muy desalentador pero importante último paso hacia la sostenibilidad señalando los problemas urgentes que subyacen en buena parte del compromiso psicológico y cultural del crecimiento: pobreza, desempleo y necesidades materiales insatisfechas. El crecimiento, estructurado tal como está en la actualidad, de hecho no resuelve estos problemas, o si lo hace es con gran lentitud e ineficacia. Hasta que no se presenten mejores soluciones, sin embargo, la sociedad jamás dejará de lado su adicción al crecimiento. Éstas son las tres áreas en las que es necesario renovar por completo el pensamiento con la mayor urgencia.

- *Pobreza.* "Compartir" es una palabra prohibida en el discurso político, probablemente a causa del profundo temor de que la igualdad real suponga insuficiencia para todos. "Suficiencia" y "solidaridad" son conceptos que pueden ayudar a estructurar nuevos enfoques para acabar con la pobreza. Todo el mundo necesita seguridades de que la suficiencia es posible y de que hay un alto compromiso social para asegurarlo. Así mismo, todos necesitan comprender que el mundo está unido ecológica y económicamente. En este *sobrepasamiento* estamos embarcados todos. Hay suficiente como para arreglarnos, si se gestiona bien. Si no hay una buena gestión, nadie escapará a las consecuencias.

- *Desempleo.* Los seres humanos necesitan trabajar, para tener la satisfacción de la productividad personal y para ser aceptados como

miembros responsables de su sociedad. Esa necesidad no puede quedar insatisfecha, y no debe ser resuelta mediante trabajos insalubres o degradantes. Al mismo tiempo, el empleo no debe ser un requisito para sobrevivir. Para construir un sistema económico capaz de utilizar y sostener las contribuciones que todos los pueblos son capaces y están dispuestos a hacer, que comparte el trabajo y el ocio equitativamente, y que no abandona a la gente que por motivos transitorios no puede trabajar, es necesario un considerable esfuerzo de creatividad.

- *Necesidades no materiales insatisfechas*. La gente no necesita coches inmensos; necesita respeto. No necesita armarios atestados de ropa; necesita sentirse atractiva y requiere excitación, variedad y belleza. La gente no necesita entretenimientos electrónicos; necesita hacer con sus vidas algo que valga la pena. Éstos son sólo algunos ejemplos. La gente necesita identidad, comunidad, retos, reconocimiento, amor, alegría. Intentar rellenar estos huecos con objetos materiales es desatar un apetito insaciable de falsas soluciones para problemas reales que nunca se satisfacen. El vacío psicológico resultante es una de las principales fuerzas que se encuentran detrás del deseo de crecimiento material. Una sociedad que puede admitir y articular sus necesidades inmateriales y hallar formas inmateriales de satisfacerlas, requeriría un nivel mucho menor de insumos globales materiales y energéticos y sería capaz de proveer niveles mucho mayores de satisfacción humana.

¿Cómo, en la práctica, se puede hacer frente a estos problemas? ¿Cómo puede evolucionar el mundo hacia un sistema que los resuelva? Ésa es la verdadera palestra en la que se debe dirimir la creatividad y la elección. Para la generación actual no sólo es necesario situarse por debajo de los límites de la tierra, sino reestructurar sus mundos interiores y exteriores. Ese proceso alcanzará a todas las palestras de la vida. Requerirá todo tipo de talento humano. Requerirá innovación no sólo técnica y empresarial, sino comunitaria, social, política, artística y espiritual. Lewis Mumford reconoció hace cincuenta años no sólo la magnitud de la tarea, sino el hecho de que se trata de una tarea esencialmente humana, una tarea que supone un reto y contribuirá al desarrollo de la *humanidad* —en el sentido más noble de la palabra— de cada uno.

Una era de expansión está dando paso a una era de equilibrio. El logro de dicho equilibrio es la tarea de los próximos siglos... El tema de esta nueva era no será el armamento y el hombre, ni las máquinas y el hombre: su tema será el resurgimiento de la vida, el desplazamiento de lo mecánico por lo orgánico, y el restablecimiento de la persona como el último término de todo el esfuerzo humano. Conocimiento, humanización, cooperación, simbiosis: éstas son las palabras cruciales de la nueva cultura de ambición universal. Cada departamento de la vida registrará este cambio: afectará a la labor de la educación y a los procedimientos de la ciencia no menos que a la organización de las empresas industriales, la planificación de las ciudades, el desarrollo de las regiones, el intercambio de los recursos mundiales[123].

La necesidad de llevar al mundo industrial desde el crecimiento hasta su siguiente etapa de evolución no es un desastre, es una oportunidad. Cómo atrapar la ocasión, cómo materializar un mundo sostenible que no sea sólo funcional sino deseable, es una cuestión de liderazgo y ética, así como de visión y coraje. Ésas son propiedades no de tecnologías, mercados, gobiernos, corporaciones o modelos de ordenadores, sino del corazón y el alma humanos. Para hablar de todo ello, los autores necesitan abrir aquí un nuevo capítulo, para quitarse sus sombreros de modelistas informáticos y despojarse de sus blancas batas de científicos, para reaparecer como sencillos seres humanos.

Capítulo 8:

SOBREPASAMIENTO SIN COLAPSO

¿Podemos impulsar a las naciones y los pueblos en la dirección de la sostenibilidad? Semejante desplazamiento constituiría una modificación de la sociedad comparable en escala a sólo otros dos cambios: la revolución agrícola de la era neolítica tardía, y la revolución industrial de los últimos dos siglos. Dichas revoluciones fueron graduales, espontáneas, y en buena medida inconscientes. Ésta deberá ser una operación totalmente consciente, guiada por las mejores previsiones que la ciencia pueda brindar... Si logramos hacerla, la empresa será verdaderamente única en toda la estancia de la humanidad sobre la tierra.

WILLIAM, D. RUCKELSHAUS[124]

Personalmente hemos estado escribiendo, hablando y trabajando sobre la evolución de la sostenibilidad durante más de veinte años. Hemos tenido el privilegio de conocer a miles de personas en cada lugar del mundo que trabajan en la misma dirección, a su manera, con su propio talento, en sus propios países. Cuando actuamos en el nivel oficial, institucional, y cuando escuchamos a los dirigentes políticos, a menudo nos sentimos frustrados. Cuando trabajamos con individuos fuera de las fronteras de las instituciones, habitualmente nos sentimos alentados.

En todas partes nos encontramos con personas que se preocupan por la tierra, por las otras personas, y por el bienestar de sus hijos y nietos. Reconocen la miseria humana y la degradación del medio ambiente que ya se ha hecho visible en el mundo, y se cuestionan si las políticas actuales que promueven el crecimiento pueden obtener objetivos mejores. Están dispuestos a trabajar en favor de una sociedad sostenible, a condición de creer que sus esfuerzos impliquen alguna diferencia beneficiosa. Preguntan: ¿Qué puedo hacer? ¿Qué pueden hacer los gobiernos? ¿Qué pueden hacer las corporaciones? ¿Qué pueden hacer los colegios, religiones, medios de comunicación? ¿Qué pueden hacer los ciudadanos, productores, consumidores, padres?

Consideramos que una experimentación comprometida guiada por esas preguntas es más importante que cualquier respuesta particular, a pesar de que abundan las respuestas. Hay "cincuenta cosas simples que usted puede hacer para salvar el planeta". Compre un coche eficiente energéticamente, recicle sus botellas y latas, vote con conocimiento en las elecciones políticas —si acaso es usted alguna de las personas que en este mundo tienen botellas, latas y elecciones—. Hay otras cosas no tan simples para hacer: desarrolle su propio estilo de vida destinado a la conservación del planeta; tenga como máximo dos hijos; trabaje con amor y compañerismo para ayudar a sacar de la pobreza a una familia; gánese la vida de "forma correcta"; cuide con responsabilidad un trozo de tierra; haga todo lo que esté a su alcance para no apoyar sistemas que oprimen a la población o abusan de la tierra.

Todas estas acciones ayudarán. Son todas necesarias. Y, desde luego, no son suficientes. Estamos hablando de una revolución, no en el sentido político, como la Revolución Francesa, sino en el sentido mucho más profundo de una Revolución Agrícola o Industrial[125]. Reciclar botellas y latas es una buena idea, pero por sí misma no acercará al mundo a ese tipo de revolución.

¿Qué puede acercarlo? En la búsqueda de una respuesta a esa pregunta, hemos considerado útil intentar comprender las dos grandes revoluciones, hasta donde los historiadores pueden reconstruirlas.

Las dos primeras revoluciones: agricultura e industria

Hace unos 8.000 años, la población humana, tras eones de una lenta acumulación, totalizó la enorme (para su época) cifra de unos 10 millones de personas. Esta población vivía como tribus de cazadores nómadas, pero su número comenzó a desbordar el número disponible de plantas y piezas de caza que hasta entonces habían abundado en su entorno. Para adaptarse al problema de la desaparición de los recursos salvajes hicieron dos cosas. Algunos intensificaron su estilo de vida migratorio. Comenzaron a abandonar sus predios ancestrales de Oriente Próximo y África y poblaron el resto del mundo rico en caza.

Otros pueblos comenzaron a domesticar animales y cultivar plantas, y a consecuencia de ello se hicieron sedentarios. Ésa era una idea totalmente nueva. Con la simple medida de quedarse en su sitio, los protogranjeros alteraron la faz del planeta y el pensamiento de la humanidad de formas que nunca podían haber imaginado.

Por ejemplo, por primera vez tenía sentido poseer tierras. Por añadidura, las personas que no tenían que transportar sus bienes podían acumular objetos. Algunas personas podían acumular más que otras. Las ideas de riqueza, herencia, comercio, dinero y poder nacieron entonces. Algunas personas podían vivir de los excedentes de alimentos producidos por otros y se convirtieron en alfareros profesionales, productores de herramientas, músicos, escribas, sacerdotes, soldados o reyes. Así surgieron, para mejor o peor, ciudades, expertos, animadores, ejércitos y burócratas.

Como herederos suyos, pensamos en la Revolución Agrícola como en un gran paso hacia adelante. En su época, sin embargo, aparentemente era una bendición a medias. Muchos antropólogos piensan que la agricultura no era una mejor forma de existencia, sino más bien una necesidad para acomodarse a la creciente población humana. Los granjeros sedentarios obtenían más alimento de una hectárea de tierra que los cazadores-recolectores, pero los alimentos tenían un nivel nutritivo mucho más bajo y menor variedad, y requerían mucho más trabajo. Los granjeros se hicieron vulnerables ante cosas que no afectaron jamás a los nómadas: clima, enfermedades, pestes, invasiones extranjeras y opresión de su propia clase dominante emergente. Dado que la población sedentaria no se alejaba de sus propios residuos, sufrieron la primera contaminación crónica de la humanidad.

La agricultura fue una respuesta eficiente a la escasez de vida salvaje. Permitió que continuara el lento crecimiento de la población, que pasados unos siglos llegó a adquirir un incremento enorme, desde aproximadamente 10 millones hasta los 800 millones en 1750. Para entonces, el crecimiento de la población había generado nuevas escaseces, especialmente en materia de tierra y energía. Era necesaria una nueva revolución.

La Revolución Industrial se inició en Inglaterra mediante la sustitución de la madera escasa por el abundante carbón. La utilización del carbón suscitó problemas prácticos inmediatos como el movimiento de la tierra, construcción de minas, bombeo de agua, transporte y combustión controlada. Requería mayores concentraciones de mano de obra alrededor de las minas y molinos, y requería la elevación de la ciencia y tecnología a una posición prominente en la sociedad humana.

Una vez más, todo cambió en una forma que nadie podría haber imaginado. El carbón desembocó en las máquinas de vapor. Las máquinas, y no la tierra, se convirtieron en los medios de produción centrales. El feudalismo dio así paso al capitalismo y al brote disidente del capitalismo: el comunismo. Carreteras, vías férreas, fábricas y chimeneas aparecieron por

todas partes. Las ciudades crecieron. Una vez más el cambio fue una bendición a medias. El trabajo fabril era aún más duro y más degradante que el agrícola. El medio ambiente en torno a los establecimientos fabriles se hizo indescriptiblemente sucio. El nivel de vida de la mayor parte de la población que formaba parte de la fuerza de trabajo estaba muy por debajo de la de un agricultor o campesino. Pero el trabajo en la fábrica era mejor que el hambre en las tierras superpobladas.

Es difícil para los que viven hoy día apreciar hasta dónde la Revolución Industrial modificó el pensamiento humano, dado que todavía sostenemos ese pensamiento. El historiador Donald Worster ha descrito el impacto filosófico de la industrialización quizá mejor de lo que pueda hacerlo cualquiera de sus herederos o practicantes:

> Los capitalistas... prometieron que, a través del dominio técnico de la tierra, podrían ofrecer una vida más justa, racional, eficiente y productiva para todos... Su método fue simplemente liberar a la empresa privada de los vínculos de la jerarquía tradicional y de la comunidad, ya fueran lazos con otros seres o con la tierra. Eso supuso enseñar a cada uno a tratar a la tierra, así como al prójimo, con franqueza y energía autosuficiente... La gente debe... pensar constantemente en términos de ganar dinero. Deben observar todo lo que los rodea —la tierra, sus recursos naturales, su propio trabajo— como materias primas potenciales que pueden dejar un beneficio en el mercado. Deben exigir el derecho a producir, comprar y vender esas materias primas sin regulación o interferencia exteriores... A medida que las necesidades se multiplicaron, a medida que los mercados se hicieron cada vez más aventurados, el vínculo entre los humanos y el resto de la naturaleza se redujo a un desnudo instrumentalismo[126].

Ese desnudo instrumentalismo condujo a una gran productividad material y a un mundo que ahora soporta, parcialmente de todas formas, más de 5.000 millones de personas. Los aventurados mercados condujeron al expolio del medio ambiente desde los polos hasta los trópicos, desde la cumbre de las montañas hasta la profundidad de los océanos. El éxito de la Revolución Industrial, como los éxitos más limitados de los cazadores-recolectores y de la agricultura, llevó eventualmente a nuevas escaseces, no sólo de caza, no sólo de tierra, no sólo de combustibles y metales, sino de la capacidad de absorción del medio ambiente.

En consecuencia, se ha creado la necesidad de otra revolución.

La próxima revolución: sostenibilidad

Es tan imposible para cualquiera hoy en día describir el mundo que podría emerger de la sostenibilidad como lo fue imaginar 6.000 años antes de Cristo el Iowa de hoy en día, o para un minero inglés de 1750 imaginar una cadena de montaje de Toyota. Lo máximo que cualquiera puede decir es que, como las otras grandes revoluciones, una revolución en la sostenibilidad podría conducir a enormes pérdidas y ganancias. Ella también podría modificar la faz de la tierra y los cimientos de la autodefinición humana, las instituciones y las culturas. Como las otras revoluciones, llevará siglos hasta su desarrollo pleno —aunque creemos que ya está en camino y que sus próximos pasos deben darse con urgencia, para hacer posible una revolución y no un colapso.

Desde luego, nadie sabe cómo desarrollar una revolución en la sostenibilidad. No hay, ni habrá, una lista en la que anotar: "Para lograr una revolución global, siga los veinte pasos mencionados abajo". Como las revoluciones que la antecedieron, ésta tampoco puede planificarse o dictarse. No seguirá una lista de imperativos de un gobierno o de un grupo de modelistas informáticos. La Revolución de la Sostenibilidad, si ocurre, será orgánica y gradual. Se desprenderá de las visiones, iluminación interior, experimentos y acciones de miles de millones de personas. El peso de hacer que ocurra no está sobre los hombros de una sola persona o grupo. Ninguna persona o grupo identificable obtendrá el crédito, aun cuando algunos tal vez tengan que soportar parte de las acusaciones. Y todos pueden contribuir.

Nuestra formación en sistemas y nuestro propio trabajo en el mundo nos han deparado dos propiedades de sistemas complejos que son importantes para el tipo de revolución consistente que estamos analizando aquí.

Primero, la información es la clave de la transformación. Eso no quiere decir necesariamente más información, mejores estadísticas, mayores bases de datos. Quiere decir nuevas direcciones para el flujo de la información, hacia nuevos receptores, con nuevo contenido, y sugiriendo nuevos objetivos y nuevas reglas (las reglas y los objetivos son de por sí información). Con diferentes estructuras informativas, el sistema se comportará inevitablemente de forma distinta. La política de *glasnost* (transparencia informativa), por ejemplo, la simple apertura de canales informativos que estuvieron cerrados durante décadas, garantizó la rápida transformación de Europa del Este. El viejo sistema se había mantenido en pie mediante un firme control de la información. El abandono de

dicho control requería algún tipo de reestructuración (turbulento e impredecible, pero inevitable) hacia un nuevo sistema acorde con la nueva información.

En segundo lugar, el sistema se resiste con firmeza a los cambios en sus flujos de información, especialmente en sus objetivos y reglas. Un sistema existente puede constreñir casi totalmente los esfuerzos de un individuo para operar sobre la base de reglas diferentes o lograr objetivos distintos de los que el sistema sanciona. No obstante, sólo los individuos, al percibir la necesidad de nueva información, reglas y objetivos, hablando de ellos y probándolos, pueden hacer los cambios que transformen los sistemas.

Por ejemplo, hemos aprendido por propia experiencia que es difícil vivir una vida de moderación material dentro de un sistema social que espera, exhorta, valora y recompensa el consumo. Pero un individuo se puede desplazar un largo trecho en el sentido de la moderación. No es fácil utilizar la energía en forma eficiente en una economía que genera productos que son ineficientes en términos energéticos. Pero uno puede buscar fuera, o, si es necesario, inventar formas más eficientes de hacer cosas. Sobre todo, es difícil poner en marcha nuevos sistemas de información dentro de un sistema que está estructurado para escuchar y procesar sólo vieja información. Basta con probar, alguna vez, a cuestionar el valor de un mayor crecimiento físico, o, incluso, a hacer una distinción entre crecimiento y desarrollo, y comprobará qué es lo que pretendemos decir. Requiere coraje y claridad comunicar una información que reta a la estructura de un sistema establecido. Pero se puede hacer.

En nuestra propia búsqueda de formas de alentar la reestructuración pacífica de un sistema que naturalmente se resiste a su propia transformación, hemos probado muchas herramientas. Las más obvias se despliegan a lo largo de todo este libro: análisis racional, datos, pensamiento de sistemas, modelo de ordenador, y las palabras más claras que somos capaces de encontrar para expresar nueva información y nuevos modelos. Ésas son herramientas que cualquiera instruido como nosotros en ciencia y economía pueden atrapar rápidamente. Como el reciclado, son útiles, necesarias, pero no suficientes.

No sabemos qué será suficiente. Pero desearíamos concluir este libro mencionando otras cinco herramientas que hemos hallado útiles, no como las formas de trabajar hacia la sostenibilidad, sino como algunas formas que han sido útiles para nosotros. Nos sentimos un poco indecisos para hablar de ellas porque no somos expertos en su utilización, y porque requieren el uso de expresiones que no salen con facilidad de la boca de

los procesadores de textos de los científicos. Son consideradas demasiado "blandas" para que sean tomadas en serio en la cínica palestra pública. Son éstas: el desarrollo de visiones, la construcción de redes, el decir la verdad, el aprendizaje y el amor.

La transición hacia una sociedad sostenible puede ser ayudada por el simple uso más habitual de estas expresiones, con sinceridad y sin disculparse, en el flujo de información del mundo.

Desarrollo de visiones

"Desarrollar visiones" quiere decir imaginar, al principio de forma general y luego con creciente especificidad, lo que realmente se quiere. Esto es, *lo que realmente uno quiere*, no lo que alguien nos ha enseñado a querer, ni tampoco aquello que hemos aprendido a desear como objetivo. Desarrollar visiones quiere decir eliminar todas las restricciones de lo que se asume como "factible", de descreimiento y desilusiones pasadas, permitiendo a nuestra mente alojarse dentro de sus sueños más nobles, altruistas y atesorados.

Algunas personas, especialmente los jóvenes, adoptan el desarrollo de visiones con facilidad y entusiasmo. Algunas otras encuentran doloroso este ejercicio, ya que un retrato ardiente de lo que podría ser hace a lo que es aún más intolerable. Algunos jamás admitirán sus visiones, por temor a ser calificados de poco prácticos o "irreales". Encontrarían este párrafo de lectura poco confortable, suponiendo que estuvieran dispuestos lisa y llanamente a leerlo. Y algunas personas han sido tan aplastadas por su propia experiencia del mundo que sólo estarán dispuestas a explicar por qué cualquier visión es imposible. Eso está muy bien; también son necesarios. La visión debe ser equilibrada por el escepticismo.

Debemos decir acto seguido, para regusto de los escépticos, que no consideramos posible que el mundo desarrolle la visión de su camino hacia un mundo sostenible. La visión sin la acción es inservible. Pero la acción sin la visión no sabe adónde ir o por qué ir hacia ahí. La visión es absolutamente necesaria para guiar y motivar la acción. Más que eso, la visión, cuando es ampliamente compartida y se la mantiene firmemente a la vista, permite materializar nuevos sistemas.

Decimos eso literalmente. Dentro de los límites de espacio, tiempo, materiales y energía, la intención visionaria del hombre puede desarrollar no sólo nueva información, nuevos comportamientos, nuevo conocimiento y nueva

tecnología, sino también y eventualmente nuevas instituciones sociales, nuevas estructuras físicas y nuevos poderes en el entorno de los seres humanos. Ralph Waldo Emerson reconoció esta extraña verdad hace 150 años:

> Cada nación y cada ser humano se rodea instantáneamente con un aparato material que se corresponde exactamente con su estado moral o su estado de pensamiento. Observen cómo cada verdad y cada error, cada pensamiento de una mente humana, se viste a sí mismo con sociedades, casas, ciudades, lenguajes, ceremonias, periódicos. Observen las ideas de la actualidad... vean cómo cada una de estas abstracciones se ha corporizado a sí misma en un aparato imponente dentro de la sociedad, y cómo la madera, los ladrillos, la cal y las piedras han adoptado la forma conveniente, obedientes a la idea maestra que reina en la mente de muchas personas... Se puede concluir, desde luego, que el menor cambio del hombre modificará sus circunstancias; el menor engrandecimiento de ideas, la menor mitigación de sus sentimientos con respecto a otros hombres... ocasionará los más sorprendentes cambios de los objetos externos[127].

Un mundo sostenible jamás podrá advenir si no puede desarrollarse una visión de él. La visión debe construirse a partir de las contribuciones de muchas personas antes de que esté completa e incite a la acción. Como una forma de alentar a los demás a unirse al proceso del desarrollo de esa visión, daremos aquí una lista de algunas de las cosas que vemos, cuando nos permitimos a nosotros mismos imaginar una sociedad sostenible en la que nos gustaría vivir[128]. Ésta no es de ninguna forma una lista definitiva o una visión completa. La incluimos sólo para invitarle a desarrollarla y ampliarla.

- Sostenibilidad, eficiencia, suficiencia, justicia, equidad y comunidad como altos valores sociales.

- Dirigentes que son honestos, respetuosos, y más interesados en hacer su trabajo que en mantener su puesto. (Recuerde, ésta es una visión, no lo que esperamos).

- Suficiencia material y seguridad para todos. Por lo tanto, por elección espontánea así como por normas comunales, bajas tasas de mortandad, bajas tasas de natalidad, y poblaciones estables.

- Trabajo que dignifique a la gente en lugar de denigrarla. Alguna forma de proveer incentivos para que la gente dé lo mejor a la sociedad y para que se les retribuya por hacerlo, mientras se asegura que la población se vea provista de lo suficiente bajo cualquier circunstancia.

- Una economía que sea un medio, y no un fin, que sirva al bienestar de la comunidad humana y al medio ambiente, en lugar de demandar que tanto la comunidad como el medio ambiente la sirvan[129].

- Sistemas de energía eficientes y renovables; sistemas de materiales ~~cíclicos~~ y eficientes.

- Diseño técnico que reduzca la contaminación y los residuos a un mínimo, y un acuerdo social para no producir contaminación o residuos que la naturaleza no pueda controlar.

- Una agricultura regenerativa que forme suelos, utilice mecanismos naturales para restablecer los nutrientes y controlar las plagas, y rinda una producción abundante de alimentos sin contaminar.

- Preservación de ecosistemas en su variedad, con las culturas humanas viviendo en armonía con esos ecosistemas —en consecuencia, gran diversidad tanto de naturaleza como de cultura, y tolerancia y aprecio humanos por esa diversidad.

- Flexibilidad, innovación (tanto social como técnica) y reto intelectual. Un florecimiento de la ciencia, una ampliación continua del conocimiento humano.

- Una mayor comprensión de los sistemas completos como una parte esencial de la educación de cada persona.

- Descentralización del poder económico, la influencia política y los conocimientos científicos.

- Estructuras políticas que permitan un equilibrio entre las consideraciones a corto y largo plazo. Alguna forma de ejercer presión política en favor de nuestros descendientes.

- Una gran habilidad por parte de la ciudadanía y los gobiernos en la resolución pacífica de los conflictos.

- Medios de difusión impresos y audiovisuales que reflejen la diversidad del mundo y al mismo tiempo unan las culturas del mundo con información relevante, exacta, a tiempo, sin desviaciones, e inteligente, situada en su contexto histórico y del conjunto del sistema.

- Razones para vivir y pensar bien de uno mismo que no requieran la acumulación de bienes materiales.

Construcción de redes

No podríamos hacer nuestra labor sin el establecimiento de redes. La mayoría de las redes a las que pertenecemos son informales. Tienen pequeños presupuestos, en caso de tenerlo, y pocas de ellas aparecen en las guías de las organizaciones mundiales. Son casi invisibles, pero sus efectos no son despreciables. Las redes informales conducen la información de la misma forma que lo hacen las instituciones formales, y a menudo de forma más efectiva. Son la sede natural de la nueva información, y a partir de ellas pueden evolucionar nuevos sistemas y estructuras.

Algunas de las redes de importancia para nosotros son muy locales, otras son internacionales. Son simplemente agrupamientos de personas que se mantienen en contacto, que hacen circular entre ellos datos, herramientas e ideas y, lo más importante, aliento. Uno de los objetivos importantes de una red es simplemente recordar a sus miembros que no están solos.

Una red es por definición no jerárquica. Es un tejido de conexiones entre iguales. Lo que la mantiene en su sitio no es la fuerza, la obligación, el incentivo material o el contrato social, sino los valores compartidos y la comprensión de que algunas tareas que pueden realizarse en forma conjunta jamás se lograrían por separado.

Sabemos de redes de granjeros que están explorando métodos orgánicos y compartiendo su experiencia. Hay redes de periodistas ecologistas, de empresarios "verdes", de modelistas informáticos, de diseñadores de juegos, de *trusts* de tierras, de cooperativas de consumidores. Hay miles y miles de redes. Surgen naturalmente a medida que seres humanos con los

mismos objetivos se encuentran unos a otros. Algunas redes se hacen tan grandes, activas y esenciales que evolucionan hacia organizaciones formales con oficinas y presupuestos, pero la mayoría van y vienen según las necesidades.

Las redes dedicadas a la sostenibilidad parecen estar formándose de forma especialmente activa en los niveles locales y globales. Nuevas organizaciones a estos niveles pueden ser especialmente necesarias para crear una sociedad sostenible que se armonice con los ecosistemas locales mientras se mantiene a sí misma bajo los límites globales. Acerca de las redes locales podemos decir poco aquí; nuestras localidades son diferentes de las vuestras. Uno de los papeles de las redes locales es ayudar a restablecer el sentido de comunidad y amistad que se ha perdido en buena medida desde la Revolución Industrial.

Si se trata de redes globales, nos gustaría hacer un llamamiento a que sean realmente globales. Los medios de participación en los flujos de información internacional están tan mal distribuidos entre los habitantes del mundo como los medios de producción. Hay más teléfonos en Tokio, se afirma, que en toda África. Eso debe ser aún más cierto en el caso de los ordenadores, máquinas de fax, conexiones aéreas e invitaciones a reuniones internacionales.

Se podría argumentar que África y otras regiones escasamente representadas del mundo tienen necesidad urgente de muchas cosas antes que de teléfonos y máquinas de fax. Nosotros sugerimos que esas necesidades no pueden expresarse efectivamente en el mundo, ni el mundo se puede beneficiar de la contribución de los pueblos escasamente representados, a menos que sus voces puedan formar parte de la conversación global. Algunas de las ganancias más grandes en la eficiencia material y energética han aparecido bajo la forma de diseño de equipos de comunicaciones. Debería ser posible, dentro de los límites de los insumos globales de la tierra, que cada uno tenga la posibilidad de acceder tanto a las redes globales como a las locales.

Si usted ve una parte de la revolución de la sostenibilidad que le interesa, puede encontrar o formar una red con otras personas que comparten su interés. La red le ayudará a descubrir adónde ir para conseguir información, qué publicaciones y herramientas están disponibles, dónde encontrar apoyo administrativo y financiero, y quién se le puede unir para tareas específicas. La red adecuada no sólo le ayudará a aprender, sino que le permitirá traspasar su aprendizaje a otros.

No, no estamos más seguros de la verdad que otro cualquiera. Pero a menudo reconocemos lo que no es cierto cuando lo escuchamos, ya provenga de nuestras propias bocas o de las de otros, y en especial cuando proviene de publicistas y de dirigentes políticos. Muchas de esas falsedades son deliberadas, y entendidas como tales tanto por los oradores como por sus escuchas. Son expresadas para manipular, adormecer o tentar, para posponer la acción, para justificar acciones al servicio de uno mismo, para obtener o preservar el poder, o para negar una realidad poco cómoda.

Las mentiras distorsionan el flujo de información. Un sistema no puede funcionar, especialmente en tiempo de peligro, si su flujo de información es confuso y está distorsionado. Uno de los puntos fuertes de la teoría de los sistemas, que esperamos que haya quedado claro en este libro, es que la información no debe ser distorsionada, retrasada o secuestrada de forma deliberada.

"El conjunto de la humanidad está en peligro", dijo Buckminster Fuller, "si cada uno de nosotros no se atreve, desde ahora y en adelante, a decir siempre sólo la verdad y toda la verdad, y a hacer eso con presteza —ahora mismo"[130]. Cada vez que hable en público, incluso a un público unipersonal, puede desnudar una mentira o afirmar una verdad, de la mejor forma que pueda entender la verdad. Se puede negar la idea de que tener más bienes nos haga mejores, o se la puede aceptar. Se puede cuestionar la idea de que el crecimiento de los ricos ayudará a los pobres, o se la puede aceptar. Cuanto más pueda alzar su voz para hacer frente a la desinformación, más gestionable será en último término su sociedad.

He aquí algunas de las tergiversaciones y simplificaciones más habituales, trampas verbales y falsedades con las que nos hemos encontrado frecuentemente al discutir los límites del crecimiento. Entendemos que deben señalarse y evitarse, si es que alguna vez debe haber claridad de pensamiento acerca de la economía humana y su relación con la tierra.

- No: Una advertencia sobre el futuro es una predicción de la catástrofe.
  Sino: Una advertencia sobre el futuro es una recomendación para seguir un sendero diferente.

- No: El medio ambiente es un lujo, una demanda competitiva o una materia prima que la gente puede comprar cuando tiene los medios para ello.
  Sino: El medio ambiente es la fuente de toda la vida y de cada economía.

- No: El cambio es sacrificio.
  Sino: El cambio es un reto y es necesario.

- No: Detener el crecimiento aherrojará a los pobres en su pobreza.
  Sino: Los modelos actuales de crecimiento están encerrando a los pobres dentro de su pobreza; necesitan un crecimiento que esté especialmente dirigido a satisfacer sus necesidades.

- No: Todos deberían alcanzar los niveles de vida material de las naciones ricas.
  Sino: Todas las necesidades materiales humanas deberían ser satisfechas materialmente y todas las necesidades inmateriales deberían ser satisfechas inmaterialmente.

- No: Todo el crecimiento es bueno, sin duda, discriminación o investigación.
  No: Todo crecimiento es malo.
  Sino: Lo que se necesita no es crecimiento, sino desarrollo. En la medida que el desarrollo requiere una expansión física, sería equitativo, sostenible y se le podría hacer frente.

- No: La tecnología resolverá todos los problemas, o la tecnología no hace más que causar problemas.
  Sino: ¿Qué tecnologías reducirán la necesidad de insumos globales, incrementarán la eficiencia, incrementarán los recursos, mejorarán las señales, pondrán fin a la pobreza, y cómo las puede alentar la sociedad?
  Y: ¿Qué podemos aportar a nuestros problemas como seres humanos, además de nuestra capacidad para producir tecnología?

- No: El sistema de mercado nos traerá automáticamente el futuro que deseamos.

Sino: ¿Cómo utilizamos el sistema de mercado, además de otras formas de organización, para alcanzar nosotros el futuro que deseamos?

- No: La industria es la causa de todos los problemas, o la solución.
  No: El Gobierno es la causa o la solución.
  No: Los ecologistas son la causa o la solución.
  No: Cualquier otro grupo (los economistas nos vienen a la cabeza) son la causa o la solución.
  Sino: Todas las personas e instituciones juegan su papel dentro de las grandes estructuras de sistemas. En un sistema que está estructurado para sobrepasar sus límites, todos los jugadores contribuirán de forma deliberada o involuntaria a ese *sobrepasamiento*. En un sistema que está estructurado para la sostenibilidad, industrias, gobiernos, ecologistas, y muy especialmente los economistas, jugarán papeles esenciales para contribuir a la sostenibilidad.

- No: Pesimismo acendrado.
  No: Optimismo infundado.
  Sino: La resolución de descubrir y decir la verdad sobre los éxitos y fracasos del presente y las posibilidades y obstáculos del futuro.
  Y sobre todo: El coraje de admitir y soportar el dolor del mundo actual, mientras se tiene la mirada puesta en la visión de un futuro mejor.

- No: El modelo World3, o cualquier otro modelo, está equivocado o está en lo cierto.
  Sino: Todos los modelos, incluidos los que están en nuestras cabezas, tienen algo correcto, en forma demasiado simple, y muchos de ellos no sirven. ¿Cómo procedemos de forma que podamos comprobar nuestros modelos y saber dónde fallan y dónde aciertan? ¿Cómo nos hablamos unos a otros como compañeros modelistas, con la mezcla adecuada de escepticismo y respeto? ¿Cómo cesamos de jugar entre nosotros al juego de cierto/falso, y comenzamos a diseñar sistemas de comprobación cierto/falso para nuestros modelos con respecto al mundo real?

Ese último reto, la elección y comprobación de los modelos, nos lleva al tópico del aprendizaje.

El desarrollo de visiones, la construcción de redes y el decir la verdad son inútiles si no desembocan en la acción. Hay muchas cosas que hacer para materializar un mundo sostenible. Se deben desarrollar nuevos métodos de cultivo. Nuevos tipos de negocios se deben iniciar y los viejos se deben rediseñar para reducir los insumos globales. La tierra se tiene que regenerar, los parques se deben proteger, se deben transformar los sistemas de energía, se deben alcanzar acuerdos internacionales. Se deben aprobar leyes, y otras deben ser rechazadas. Se debe enseñar a los niños y a los adultos. Se deben hacer películas, se debe ejecutar música, se deben publicar libros, se debe aconsejar a la gente y se deben dirigir los grupos.

Cada persona encontrará su mejor papel en todas estas labores. No presumiremos de prescribir ese papel para nadie, sino para nosotros mismos. Pero haremos una sugerencia acerca de cómo hacer cualquier cosa que se haga. Hágala con humildad. No como una declaración política, sino como un experimento. Utilice su acción, cualquiera que ella sea, para aprender.

Las profundidades de la ignorancia humana son mayores de lo que la mayoría de los humanos están dispuestos a admitir. Especialmente en un momento en que la sociedad global se está convirtiendo en un todo más integrado que en cualquier época pasada, cuando esa sociedad está presionando sobre los límites dinámicos de un planeta de una sorprendente complejidad, y cuando formas totalmente nuevas de pensar se están desarrollando, nadie sabe realmente lo suficiente. Ningún dirigente, no importa cuán autoritario pretenda ser, comprende la situación. Ninguna política puede ser declarada como La Política que deba ser impuesta sobre el mundo.

Aprender supone la voluntad de ir despacio, de probar las cosas y recoger la información sobre el efecto de las acciones, incluyendo la crucial pero no siempre bien recibida información de que una política determinada o una acción no funciona. No se puede aprender sin cometer errores, reconocerlos y seguir adelante. Aprender significa explorar un nuevo sendero con vigor y coraje, estar abierto a la exploración que otras personas hagan de nuevos caminos, y estar dispuesto a modificar un camino si nuevos datos sugieren que hay otro que nos conduce con más eficiencia o directamente hacia la meta.

Los dirigentes del mundo han perdido tanto el hábito de aprender como la libertad de aprender. De alguna forma ha surgido un sistema cultural que asigna a la mayor parte de la gente el papel de seguidores, quienes esperan que sus líderes tengan todas las respuestas. Este sistema

perverso no permite el desarrollo de la capacidad de liderazgo en la gente o la capacidad de aprendizaje en los líderes.

Es hora de ejercitar la verdad. Los dirigentes del mundo saben, tanto como cualquier otra persona, cómo materializar sociedad sostenible; muchos de ellos ni siquiera saben que es necesario hacerlo. Una revolución de la sostenibilidad requiere que cada persona actúe de alguna forma como un dirigente dispuesto a aprender, desde la familia hasta la comunidad, pasando por la nación y el mundo. Y eso requiere que cada uno de nosotros apoye a los dirigentes en todos los niveles de su aprendizaje, creando un ambiente que les permita admitir la incertidumbre, efectuar experimentos y reconocer los errores.

Nadie puede disponer de libertad para aprender, sin paciencia y capacidad de perdonar. Pero en una situación de *sobrepasamiento*, con la posibilidad del colapso en el horizonte, no hay mucho tiempo para la paciencia y el perdón; hay necesidad de acción, determinación, coraje, disponibilidad. Encontrar el equilibrio adecuado entre los aparentes opuestos de urgencia y paciencia, disponibilidad y perdón, es una tarea que requiere compasión, humildad, una cabeza despejada y honestidad.

En la lucha por un mundo sostenible, no es necesario demasiado tiempo para que aun las personas más experimentadas, racionales y prácticas, incluso aquellas que no han sido formadas en el lenguaje del humanismo, comiencen a hablar, con las palabras que puedan dominar, de la virtud, la moralidad, la sabiduría y el amor.

Amor

No se admite hablar de amor en la cultura contemporánea, salvo que hablemos en el sentido más romántico y trivial de la palabra. Cualquiera que apele a la práctica de un amor fraternal entre la gente muy probablemente será objeto del ridículo antes que se le tome en serio. La diferencia más profunda entre optimistas y pesimistas es su posición en el debate acerca de si los seres humanos son capaces de operar en forma colectiva sobre la base del amor. En una sociedad que desarrolla de forma sistemática el individualismo de las personas, su competitividad y su cinismo, los pesimistas constituyen una gran mayoría.

El pesimismo es uno de los más grandes problemas del actual sistema social, pensamos, y la razón más profunda de la imposibilidad de un mundo sostenible. Una cultura que no puede creer en, discutir y desarrollar las mejores cualidades humanas adolece de una trágica distorsión de

la información. "¿Cuán buena es la sociedad que la naturaleza humana puede admitir?", se preguntó el psicólogo Abraham Maslow. "¿Cuán buena es la naturaleza humana que una sociedad puede admitir?"[131].

La revolución de la sostenibilidad deberá ser, por encima de todo, una transformación social que permita expresarse y nutrirse a lo mejor de la naturaleza humana, y no a lo peor de ella. Muchas personas han reconocido dicha necesidad y esa oportunidad. Por ejemplo, John Maynard Keynes escribió en 1932:

> El problema de la necesidad, la pobreza y la lucha económica entre clases y naciones no es más que un desorden alarmante, un desorden innecesario y transitorio. Puesto que el Mundo Occidental ya posee la técnica y los recursos, si pudiéramos crear la organización para utilizarlos, capaz de reducir el Problema Económico, que absorbe en la actualidad nuestra energía moral y material, hasta una posición de importancia secundaria... De tal forma... no está lejano el día en que el Problema Económico ocupará las sillas de la última fila, las que le pertenecen, y... la palestra del corazón y la mente quedará ocupada... por nuestros problemas reales —los problemas de la vida y de las relaciones humanas, de la creación, la conducta y la religión[132].

Aurelio Peccei, el gran líder industrial que escribió incansablemente sobre los problemas de los límites y el crecimiento, acerca de la economía y el medio ambiente, sobre los recursos y la cualidad de gobernar, jamás dejó de sacar la conclusión de que la respuesta a los problemas del mundo comienza con un "nuevo humanismo":

> El humanismo acorde con nuestra época debe reemplazar y rectificar principios y normas que desde hace tiempo y hasta nuestros días han sido considerados intocables, pero que se han hecho inaplicables, o discordantes con nuestros objetivos; debe alentar el auge de nuevos sistemas de valores para recomponer nuestro equilibrio interno, y de nuevas motivaciones espirituales, éticas, filosóficas, sociales, políticas, estéticas y artísticas para llenar el vacío de nuestras vidas; debe ser capaz de restablecer dentro de nosotros... el amor, la amistad, la comprensión, la solidaridad, el espíritu de sacrificio, la convivencia; y debe hacernos comprender que cuanto más estrechamente nos unan estas cualidades a las otras formas de vida y a nuestras hermanas y hermanos de todo el mundo, más ganaremos[133].

Es difícil hablar de o practicar el amor, la amistad, la generosidad, la comprensión o la solidaridad dentro de un sistema cuyas reglas, objetivos y flujos de información están destinados a cualidades humanas menores. Pero lo intentamos, y le urgimos a intentarlo. Sea paciente con usted y los demás, mientras usted y ellos hacen frente a las dificultades de un mundo cambiante. Comprenda y establezca empatía con inevitable resistencia; hay ciertas resistencias, cierto aferrarse a las vías de la insostenibilidad, dentro de cada uno de nosotros. Incluya a todos dentro del nuevo mundo. Todos serán necesarios. Busque y confíe en los mejores instintos humanos, dentro de usted mismo y de los demás. Escuche el cinismo que le rodea y tenga piedad de quienes creen en él, pero no lo crea usted.

El mundo jamás podrá superar en forma segura la aventura de reducir su nivel de actividad por debajo de los límites si tal aventura no se acomete con un espíritu de compañerismo global. El colapso no se podrá evitar si la gente no aprende a verse a sí misma y a los demás con compasión. Nosotros nos alineamos en el optimismo. Creemos que la gente puede encontrar esa compasión dentro de sí misma si se les da la oportunidad, sin ridiculizarlos, de hacerlo.

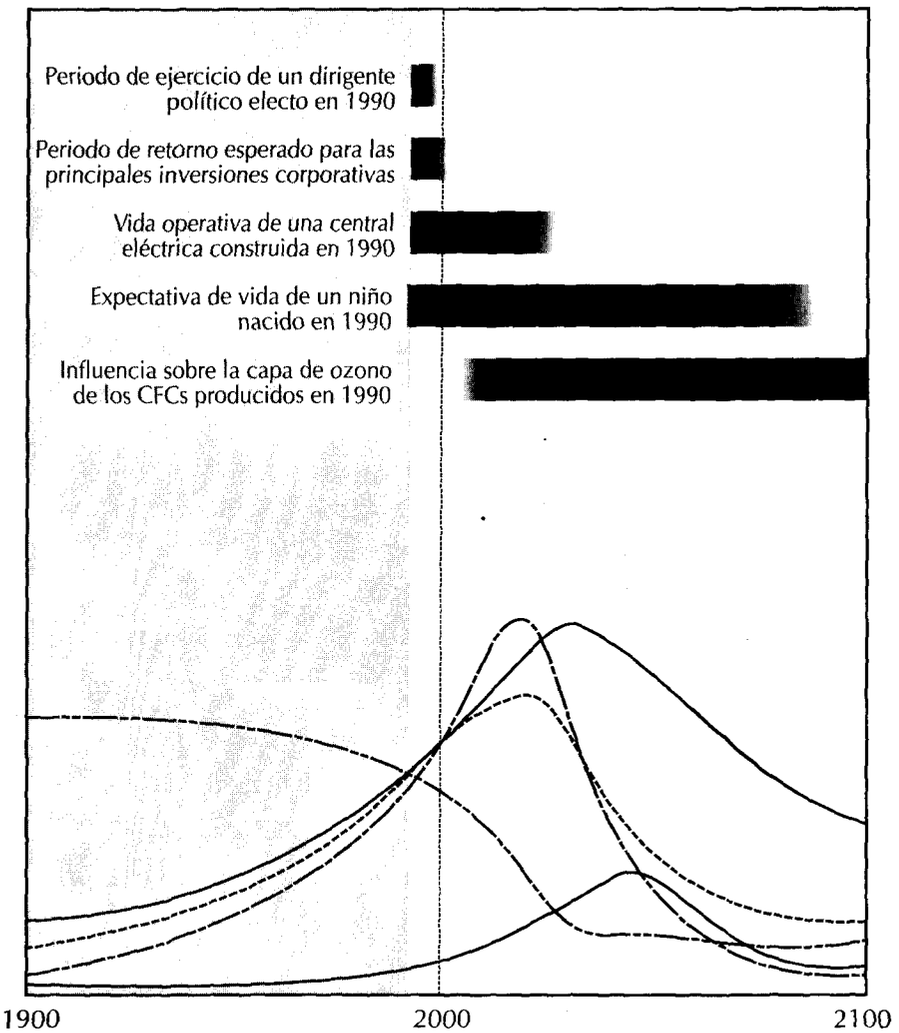
¿Son realmente posibles cualesquiera de los cambios por los que hemos abogado en este libro, desde una mayor eficiencia en los recursos hasta una mayor compasión humana? ¿Puede en realidad el mundo acompasarse por debajo de los límites para evitar el colapso? ¿Hay acaso suficiente tiempo? ¿Hay suficiente dinero, tecnología, libertad, visión, comunidad, responsabilidad, previsión, disciplina y amor a escala global?

De todas las preguntas formuladas en este libro, ésas son las más difíciles de responder, pese a que muchas personas pretendan saber las respuestas. La alegría ritual de muchas personas mal informadas, en particular muchos dirigentes mundiales, dirá que los problemas señalados ni siquiera son relevantes, no hay límites significativos. Muchos de aquellos que sí están informados y que se preocupan por el problema del *sobrepasamiento* de los límites están infestados por el profundo cinismo público que yace precisamente por debajo de la alegría ritual. Dirán que ya existen graves problemas, y otros más graves aún en el futuro, y que no hay ninguna posibilidad de resolverlos.

Ambas respuestas están desde luego basadas en modelos mentales. La verdad es que nadie lo sabe.

Hemos dicho muchas veces en este libro que el mundo hace frente no a un futuro preformado, sino a una elección. La elección es entre modelos.

Ilustración 8-1 HORIZONTE TEMPORAL DEL MODELO WORLD3



Un modelo afirma que este mundo finito carece de límites a efectos prácticos. Elegir dicho modelo nos llevará todavía más allá de los límites, y, creemos, al colapso.

Otro modelo dice que los límites son reales y están próximos, que no hay suficiente tiempo, y que la gente no puede ser moderada, responsable o compasiva. Ese modelo es autosuficiente. Si el mundo decide creerlo, el mundo estará en lo cierto, y el resultado será también el colapso.

Hay un tercer modelo según el cual los límites son reales y están próximos, y hay el tiempo justo, sin tiempo que perder. Hay la cantidad justa de energía, materiales, dinero, resistencia del medio ambiente y virtud humana para lograr una revolución en pro de un mundo mejor.

Ese modelo puede que esté equivocado. Toda la evidencia que hemos visto, desde los datos mundiales hasta los modelos globales de ordenador, sugiere que puede ser correcto. No hay otra forma de saberlo con seguridad que probarlo.

APÉNDICE: INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA CON WORLD3

Cuando un modelo ha alcanzado la perfección formal de World3, y cuando tanto esfuerzo y talento han sido invertidos en la presentación de su metodología con un detalle inteligible, sus conclusiones no pueden ser desechadas sin recurrir a métodos similares y suscitando nuevas preguntas que deberán ser respondidas mediante nuevos modelos.

ETIENNE VAN DE WALLE[134]

En este libro hemos descrito intuiciones y conclusiones básicas sobre las causas y consecuencias a largo plazo del crecimiento físico en el sistema global. Nuestro equipo desarrolló originariamente estas observaciones a lo largo de dos años de investigaciones que incluyeron el diseño, construcción y análisis del modelo matemático formal World3. No obstante, para juzgar cuán plausibles son nuestros resultados no es necesario que haga usted sus propios ensayos con el modelo; para evaluar nuestras conclusiones, la gran mayoría de los lectores sólo necesitará una comprensión intuitiva de la dinámica basada en la experiencia de un "mundo real" con cambios exponenciales, límites, retrasos, y errores de percepción y respuesta.

En consecuencia, la mayoría de las personas que lean nuestro informe podrán juzgar qué nivel de credulidad le asignan a nuestros resultados sin necesidad de recurrir al ordenador. Pero, si desea utilizar el World3 en su propia investigación o enseñanza, debe, desde luego, estudiar los detalles de nuestro modelo. Puede que quiera responder a nuestras proyecciones, desarrollar nuevos escenarios que muestren las implicaciones de otros supuestos, o generar materiales pedagógicos basados en ordenador para utilizar como ayuda para que otros entiendan los principios del análisis de sistemas o para considerar futuros globales. Eso requerirá un conocimiento detallado del modelo.

Ilustración A-1 CONTAMINACIÓN PERSISTENTE

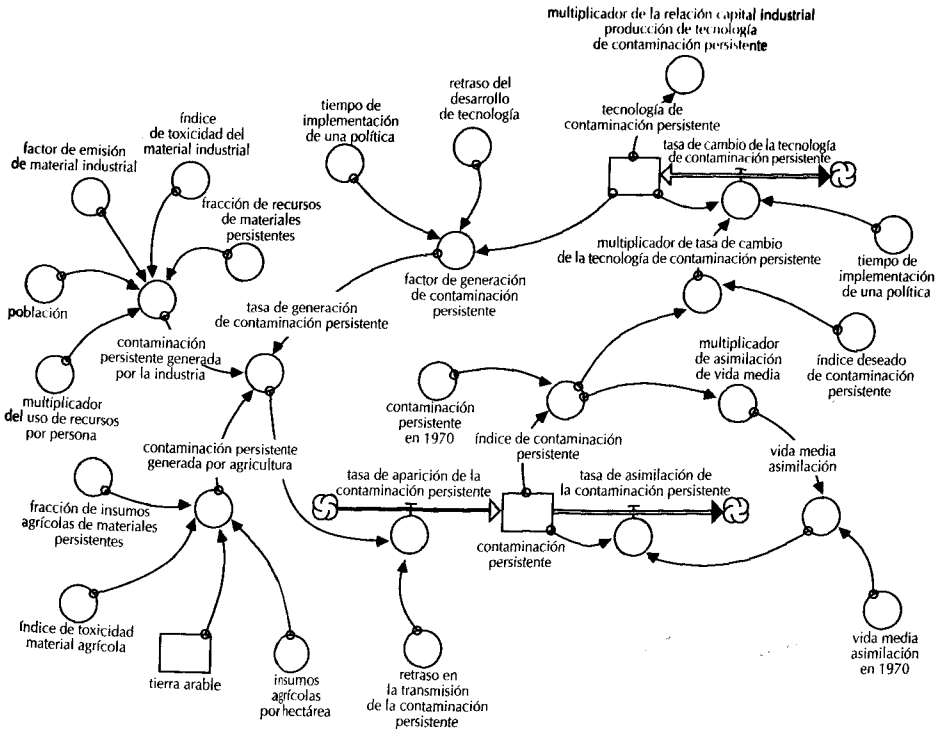
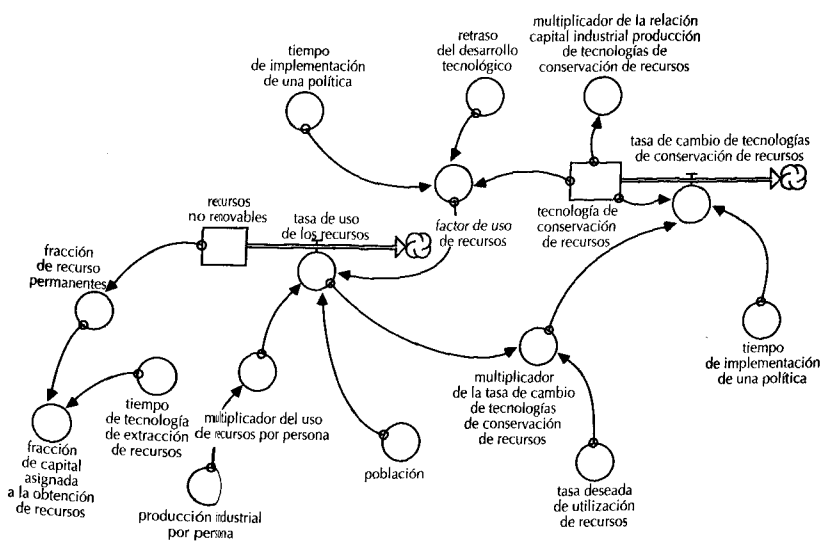


Ilustración A-2 RECURSOS NO RENOVABLES



En este apéndice ofrecemos la información necesaria para comenzar. En primer lugar, presentamos una serie de nueve diagramas en los que se representan los principales elementos y relaciones en el modelo. En segundo lugar, describimos las ecuaciones de cambio utilizadas para convertir la versión de World3 empleada en *Los límites del crecimiento* en el World3/91, la versión del modelo que fue utilizada en este libro. Transcribimos las ecuaciones DYNAMO originales en las ecuaciones STELLA, de forma tal que nuestros escenarios puedan ser generados en un microordenador Macintosh. Luego, efectuamos siete modificaciones en las constantes y cuadros de funciones de World3 para reflejar los cambios numéricos revelados por el análisis de los datos globales de los últimos veinte años. También hemos alterado nuestra representación de los medios por los cuales el cambio tecnológico influye en los coeficientes del modelo.

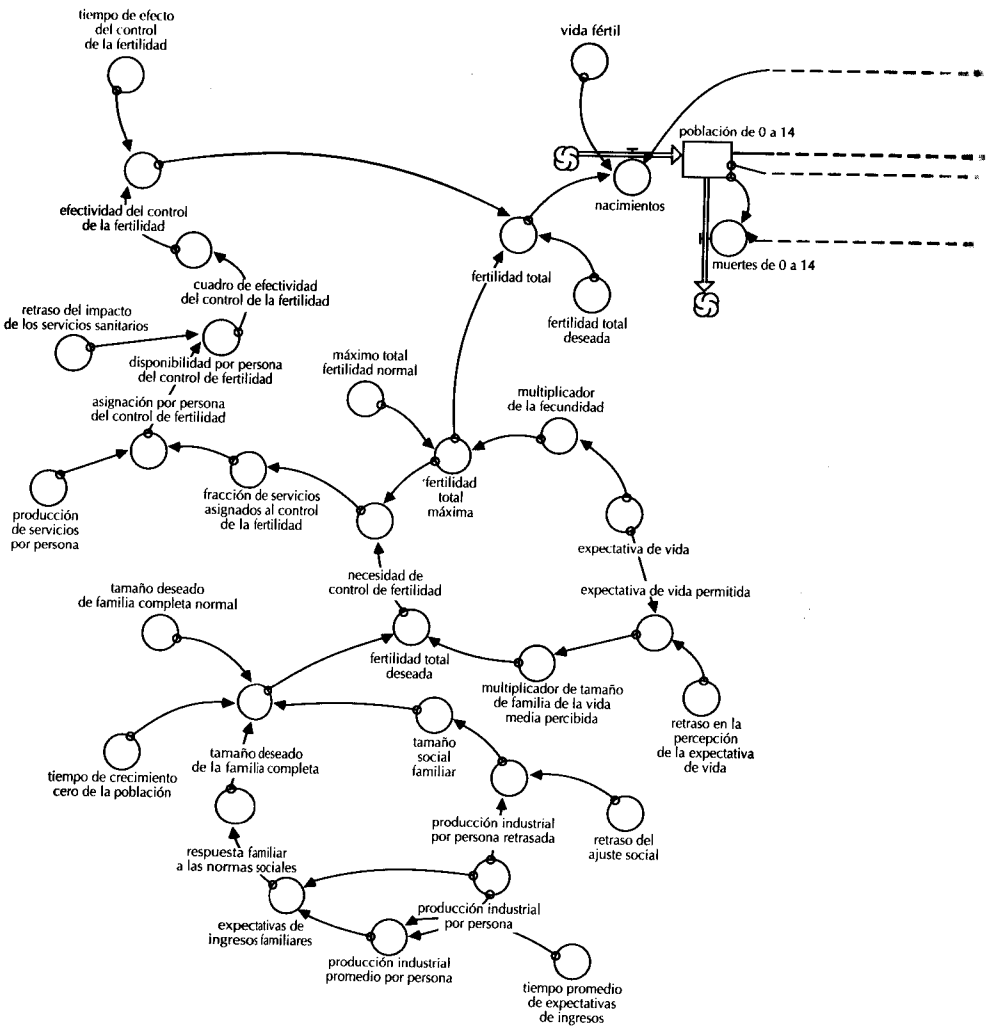
Finalmente, describimos cómo se pueden adquirir las tres herramientas que se necesitan para experimentar con el modelo World3/91 revisado: la documentación técnica para el modelo, un conjunto de ecuaciones de World3/91 para ordenadores Macintosh o IBM-compatibles, y el correspondiente *software* de simulación que se adapta a su ordenador.

Elementos y relaciones en World3

El modelo comprende cinco sectores: contaminación persistente, recursos no renovables, población, agricultura (producción de alimentos, fertilidad del suelo, y desarrollo y pérdida de tierras) y economía (producción industrial, producción de servicios y empleo). Los principales elementos y relaciones de estos sectores se encuentran en las ilustraciones A-1 hasta la A-9. Los nombres precisos de los elementos utilizados en las ecuaciones STELLA del World3/91 no se emplean en estas nueve ilustraciones. Para hacer estos diagramas tan comprensibles como sea posible, hemos eliminado todas las abreviaturas y números de las ecuaciones que fueron utilizadas en las ecuaciones del modelo informático.

No hemos hecho en este apéndice ningún intento de explicar o justificar el World3. A excepción de los ocho cambios descritos en la sección siguiente, el valor numérico de todos los coeficientes y la naturaleza precisa de todas las relaciones en la versión original del World3 están documentados en las 637 páginas de nuestro informe técnico *Dinámicas del crecimiento en un mundo finito*[135].

Ilustración A-3a SECTOR DE POBLACIÓN

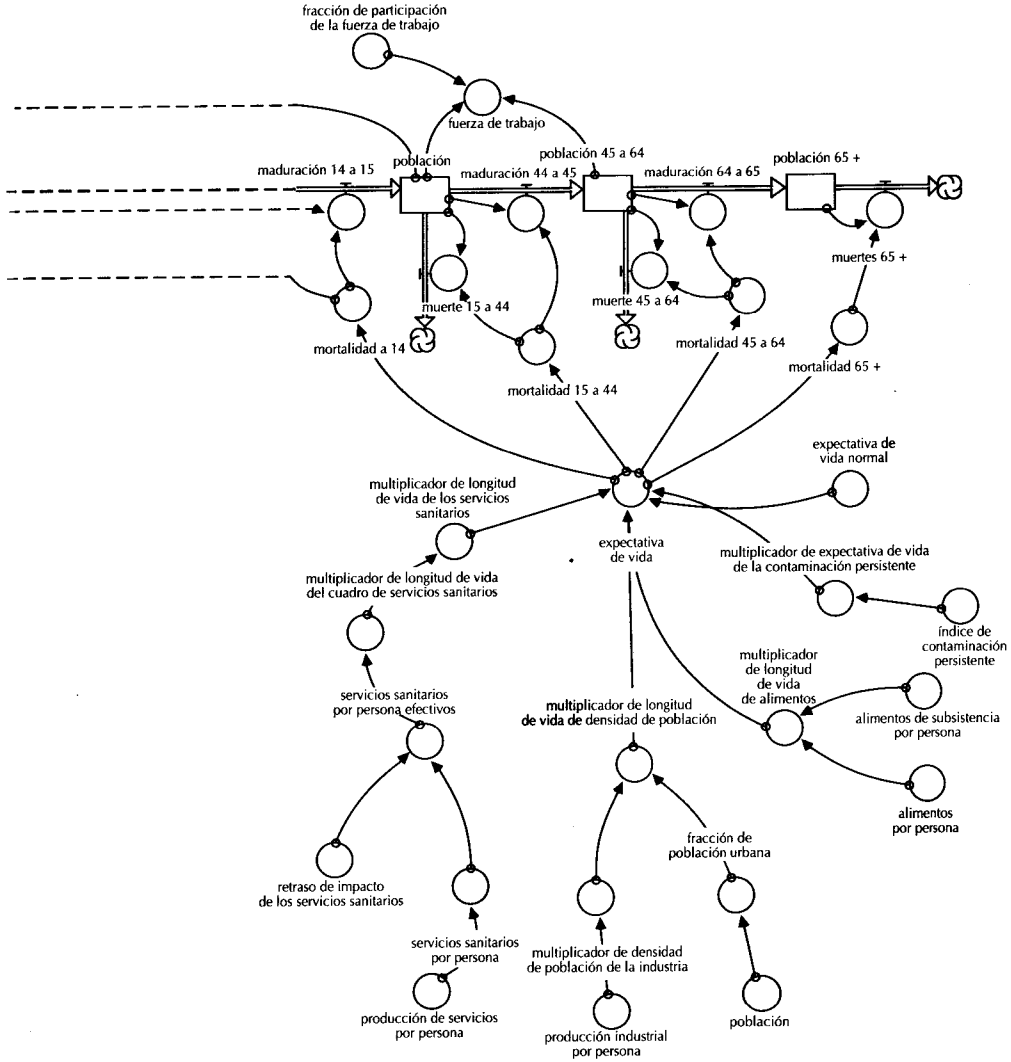


Ese libro también incluye una lista completa de las ecuaciones del modelo World3 y los cambios necesarios para generar todos los escenarios presentados en *Los límites del crecimiento*.

Creando la versión STELLA del World3

El modelo original del World3 fue creado en el lenguaje de simulación DYNAMO[136]. No hay un compilador de DYNAMO para la familia de micro-

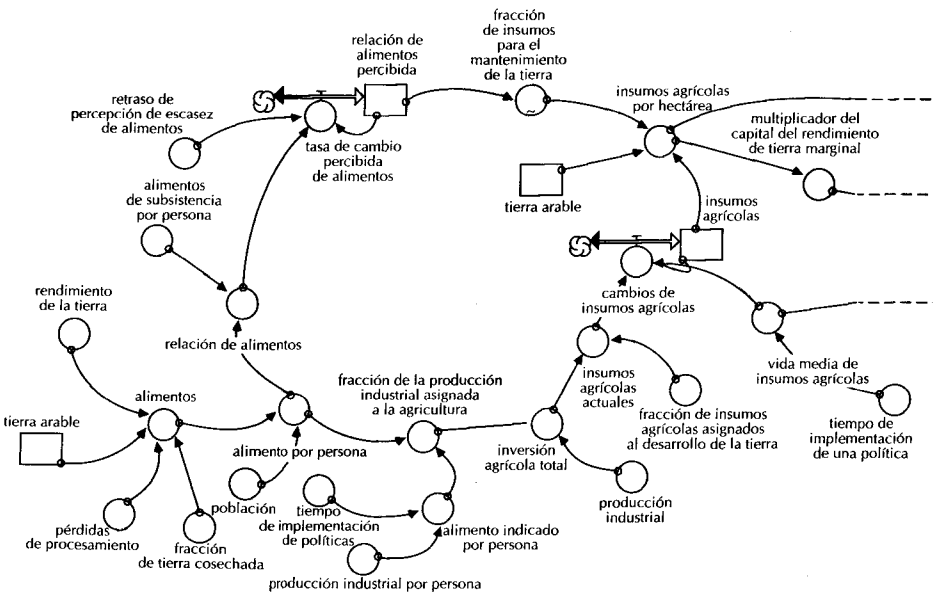
Ilustración A-3b SECTOR DE POBLACIÓN



ordenadores Macintosh, por lo cual comenzamos nuestro análisis convirtiendo el World3 al STELLA[137]. Una de las ventajas del STELLA sobre el DYNAMO es la aceptación de nombres variables más largos e inteligibles. Hemos mantenido la estructura del World3, pero rebautizamos los elementos.

Dado que STELLA tiene un conjunto de funciones especiales levemente distintas a las utilizadas en DYNAMO, fue necesario hacer algunos cambios en las ecuaciones del World3 para implantarlas en el STELLA. Dichos cambios en las ecuaciones son como sigue:

Ilustración A-4a PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

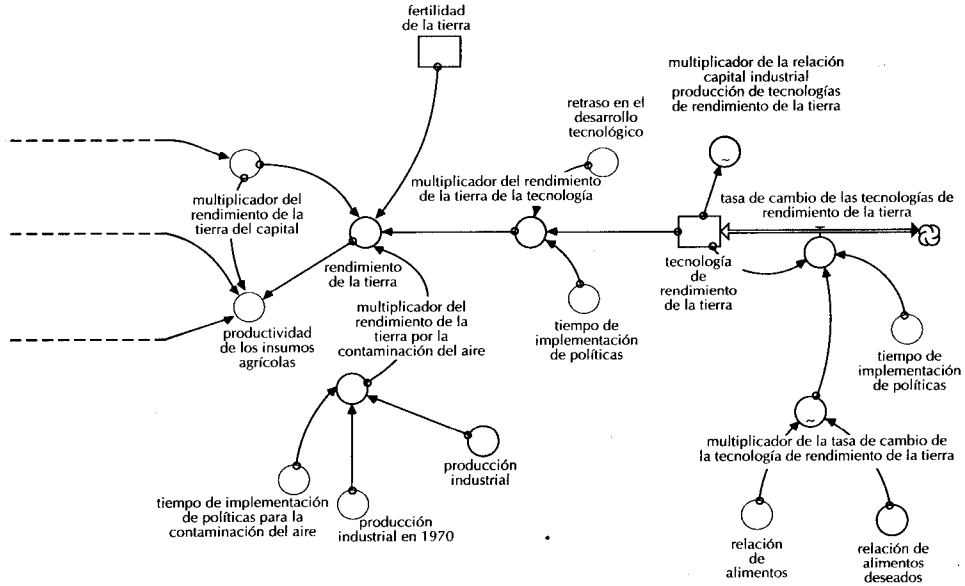


- En cuatro ecuaciones, la función de retraso material de tercer orden (DELAY3) en DYNAMO fue reemplazada por un retraso de información de tercer orden (SMTH3) en STELLA. Este cambio carece de efecto mientras el periodo del retraso se mantenga constante a lo largo de toda la simulación, que es el caso en el World3 y en World3/91.

- En tres casos, la función de retraso de información de primer orden (SMOOTH en DYNAMO, SMTH1 en STELLA) no podía utilizarse en STELLA, porque habría introducido un bucle simultáneo de ecuación. Fue sustituida por un equivalente, la estructura de flujo explícito de *stock*.

- La función CLIP de DYNAMO, que opta entre dos insumos en un tiempo especificado, fue reemplazada por la proposición SI/ENTONCES/0TRO en el STELLA.

Ilustración A-4b PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS



Ninguno de estos cambios en las ecuaciones altera los resultados numéricos o el comportamiento del modelo. La versión STELLA del Wolrd3 obtiene resultados idénticos a los de DYNAMO recogidos en *Los límites del crecimiento* y en *Dinámicas del crecimiento en un mundo finito*.

Cambiando el World3 para crear el World3/91

Una vez traducido el modelo World3 para operar con el STELLA, examinamos su funcionamiento entre los años 1970 y 1990. Generalmente, el comportamiento de las variables clave del modelo, como la población y la producción de alimentos, era similar a los datos históricos para estas mismas variables durante las pasadas dos décadas. No hemos encontrado razón alguna para hacer cambios estructurales en las ecuaciones del modelo.

Sin embargo, los datos empíricos sobre el comportamiento del sistema global durante las pasadas dos décadas apuntaron a varios coeficientes y cuadros de funciones que necesitaban revisiones menores. A consecuencia de esta comprobación, efectuamos siete modificaciones de parámetros.

Ilustración A-5 FERTILIDAD DE LA TIERRA

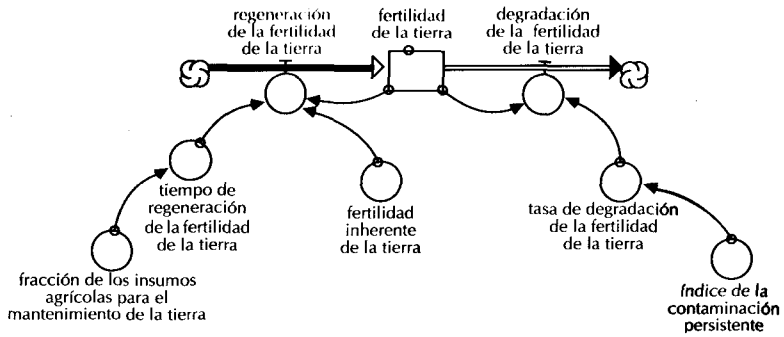
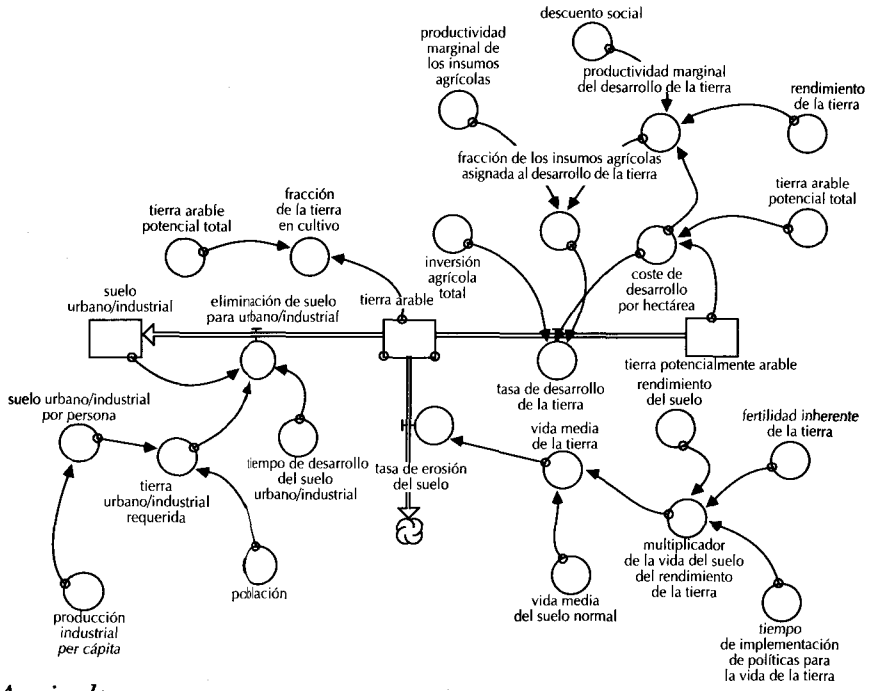


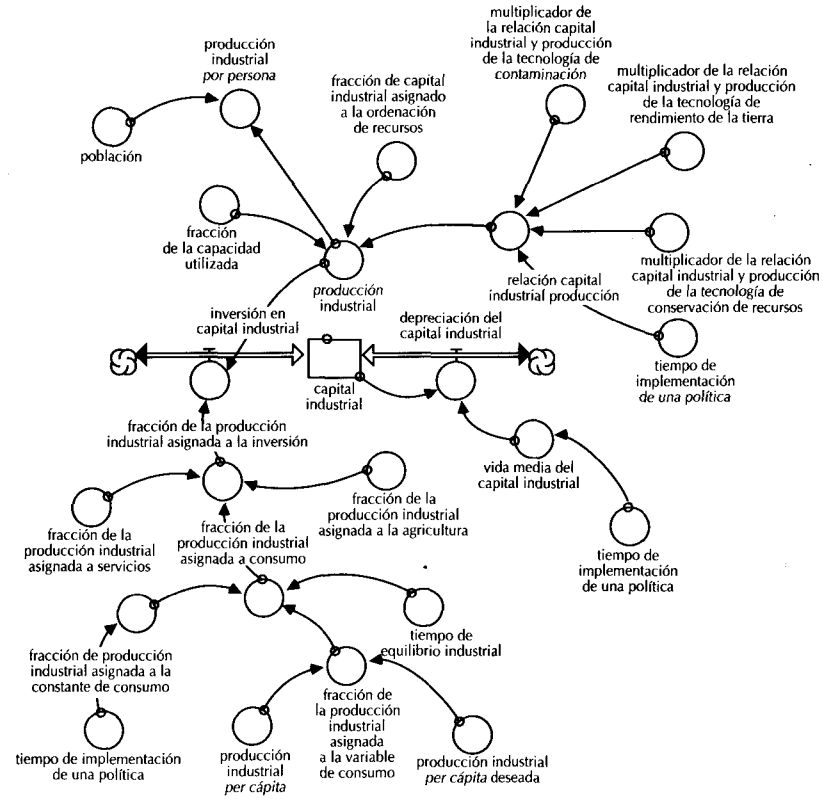
Ilustración A-6 DESARROLLO Y PÉRDIDA DE TIERRA



Agricultura

De los datos de los pasados veinte años se desprende que los coeficientes de la versión original de World3 subestiman el impacto de la erosión sobre el *stock* de tierra arable disponible, así como el impacto de los insumos agrícolas en su capacidad de elevar el rendimiento del suelo. Dado que estos dos efectos tenían sentidos opuestos, la producción total de alimentos proyectada por el World3 durante el periodo entre

Ilustración A-7 PRODUCCIÓN INDUSTRIAL



1970 y 1990 se mantenía de todas formas en armonía con los datos históricos. Para hacer más realistas los parámetros del modelo, de todas formas, se redujo la vida media de la tierra disponible en el World3/91 de 6.000 a 1.000 años, e incrementamos parte del cuadro de funciones que definen el impacto de los insumos agrícolas sobre el rendimiento del suelo.

Población

El World3 subestimaba la tasa global de declinación, tanto en las tasas de natalidad como en las de mortandad, durante las pasadas dos décadas. Una vez más estos errores no desviaron exageradamente a las proyecciones de los datos reales durante las dos últimas décadas.

Para el World3/91 hemos revisado los coeficientes del modelo para hacerlos más representativos de la experiencia histórica. Hemos reducido

Ilustración A-8 PRODUCCIÓN DE SERVICIOS

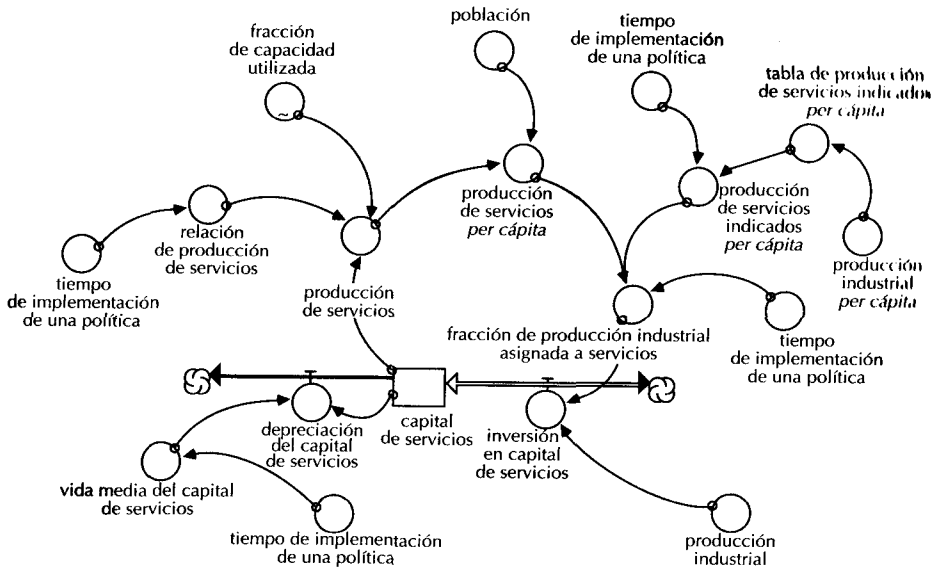


Ilustración A-9 EMPLEOS

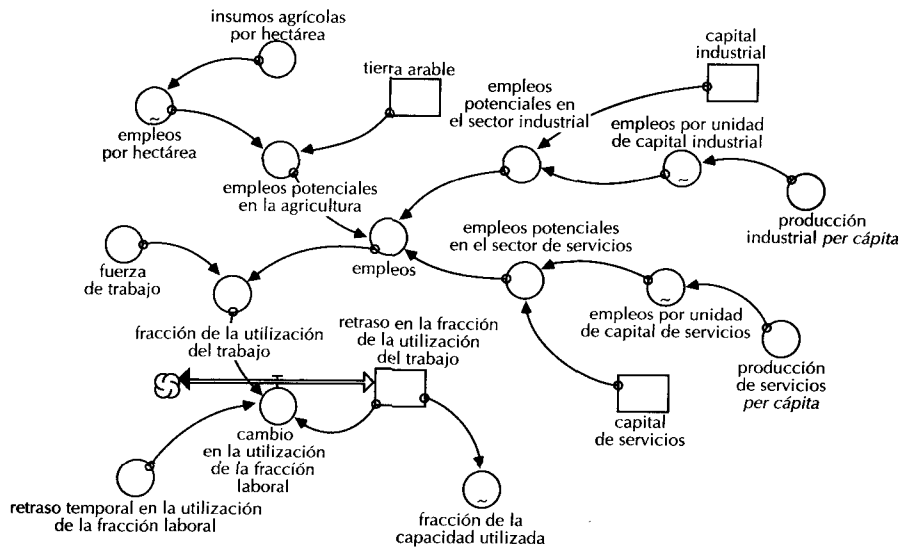
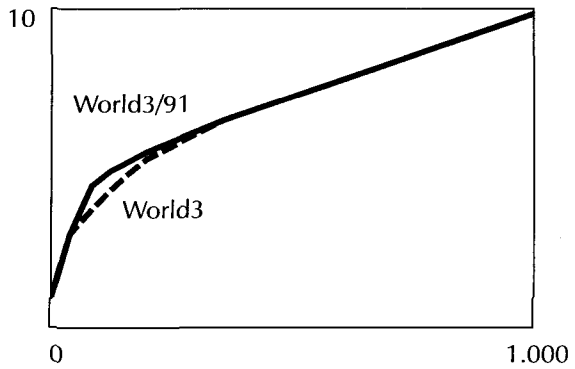


Ilustración A-10 GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE INSUMOS AGRÍCOLAS Y RENDIMIENTO DE LA TIERRA

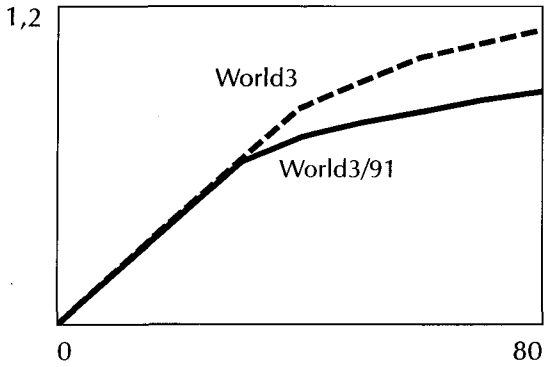
Multiplicador del capital para el rendimiento de la tierra marginal



Insumos agrícolas por hectárea

Ilustración A-11 GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE SALUD HUMANA Y FERTILIDAD

Multiplicador de la fecundidad



Expectativas de vida

el multiplicador de la fecundidad, que determina el impacto de la salud humana sobre la fertilidad.

Redujimos el tamaño de la familia normal ya completa de 4,0 a 3,8. Revisamos al alza la influencia del consumo de alimentos sobre la vida media. Aumentamos el impacto de los servicios sanitarios elevando las expectativas de vida, incluso en niveles bajos de servicios por persona.

Ilustración A-12 GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE CONSUMO DE ALIMENTOS Y LONGEVIDAD

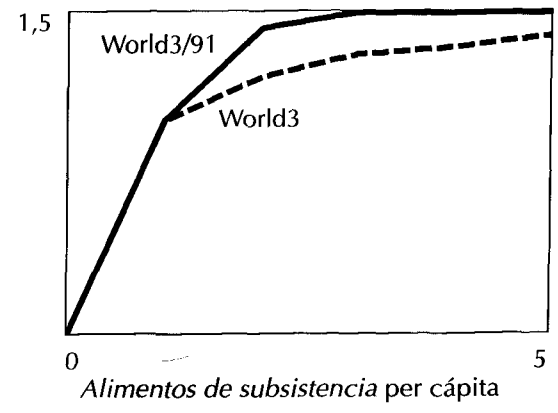
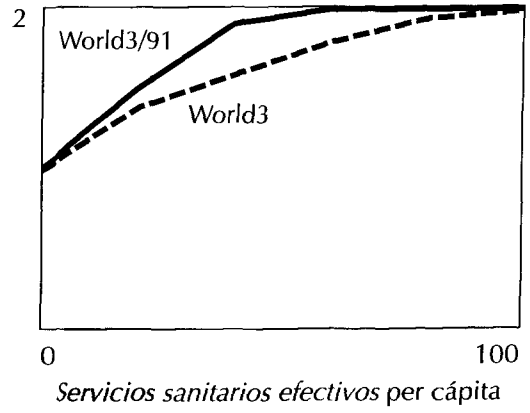


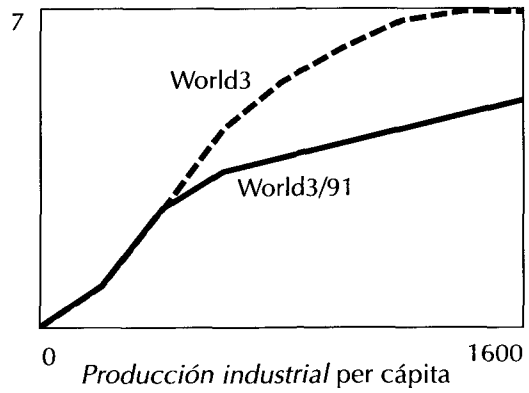
Ilustración A-13 GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE SERVICIOS SANITARIOS Y EXPECTATIVAS DE VIDA



Recursos

La experiencia en las naciones más industrializadas durante los últimos veinte años sugiere que nuestras estimaciones originales de la utilización de recursos por unidad de producción industrial pueden haber sido demasiado altas. Redujimos las estimaciones del consumo de recursos a niveles más altos de producción industrial por persona.

Ilustración A-14 GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y UTILIZACIÓN PER CÁPITA DE RECURSOS NO RENOVABLES

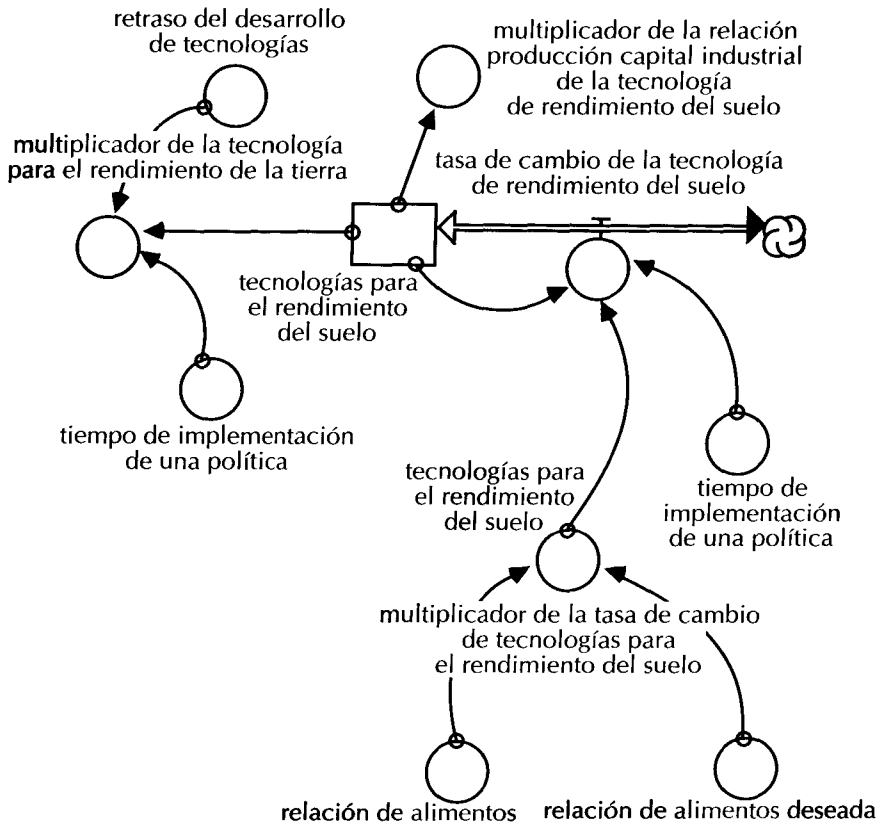


Tecnología

En *Los límites del crecimiento*, las políticas para comprobar las implicaciones posibles de las nuevas tecnologías fueron introducidas en general mediante traslaciones exógenas e instantáneas de un coeficiente a otro o de un cuadro de funciones a otro. Para producir los escenarios de este informe, en lugar de ello, hemos utilizado la estructura de la tecnología adaptativa que fue descrita en el capítulo 7 de nuestro informe técnico. En esta aproximación adaptativa hay una meta del sistema, por ejemplo, un nivel deseado de contaminación persistente. Cuando el estado presente del sistema se desvía de la meta en una dirección negativa, por ejemplo, la contaminación persistente se hace mayor de lo deseado, el capital se asigna a nuevas tecnologías. Tras un retraso para representar los efectos del desarrollo tecnológico y su difusión, los coeficientes del modelo se ajustan para representar el impacto de la nueva tecnología, que actúa para reducir el problema. Este proceso de desarrollo de tecnologías adaptativas continúa hasta que el modelo del mundo logra otra vez su meta. Para lograr los avances tecnológicos, cantidades modestas de capital industrial son desviadas de la producción industrial para la adquisición y mantenimiento de nuevas tecnologías.

El segmento del diagrama de flujo del STELLA de la Ilustración A-15 indica cómo esta fórmula de aproximación se implantó para tecnologías que mejoren el rendimiento de la tierra.

Ilustración A-15 LA FORMULACIÓN DE SISTEMA UTILIZADA PARA REPRESENTAR LA TECNOLOGÍA ADAPTATIVA QUE AFECTA AL RENDIMIENTO DE LA TIERRA EN EL WORLD3/91



Escenarios

Después de la introducción de los siete cambios de coeficientes, pero con todas las políticas tecnológicas puestas en Cero, obtuvimos una versión del World3/91 que se correspondía con los ensayos estándar del World3 en *Los límites del crecimiento*. A éste se le designó escenario 1 en este informe. Luego se alteró el escenario 1 para crear el resto de los otros escenarios numerados y también el escenario de tecnología ilimitada.

Cuadro A-1 ESCALAS VARIABLES EN LOS ESCENARIOS DEL WORLD3/91

Variable	Valor Bajo	Valor alto
Estado del mundo		
Población	0	13×10^9
Producción total de alimentos	0	6×10^{12}
Producción total industrial	0	4×10^{12}
Índice de contaminación persistente	0	40
Recursos renovables	0	2×10^{12}
Nivel material de vida		
Alimentos *per cápita*	0	1.000
Bienes de consumo *per cápita*	0	250
Servicios *per cápita*	0	1.000
Expectativas de vida	0	90

Las escalas del escenario World3/91

Los valores de cinco variables se encuentran registrados para cada escenario en el gráfico "Estado del mundo"; cuatro variables están registradas en el gráfico "Nivel material de vida". No se han colocado las escalas numéricas en los ejes verticales (ordenadas) porque no consideramos que los valores precisos de las variables en cada escenario sean muy significativos. De todas formas, detallamos aquí esas escalas para lectores con un mayor interés técnico en las simulaciones. Las nueve variables están registradas sobre escalas muy divergentes, pero esas escalas se mantienen constantes a lo largo de los catorce escenarios. Para interpretar estas gamas se deberá estudiar la descripción de cada variable que se presenta en el informe técnico.

La documentación técnica del World3

Dinámicas del crecimiento en un mundo finito es una descripción técnica exhaustiva de World3. El libro describe la historia y los propósitos del modelo, define cada variable, describe y justifica cada hipótesis causal incorporada al World3, da la lista detallada de ecuaciones en el lenguaje de ordenador DYNAMO, y da un gran número de simulaciones para ilustrar el comportamiento de los cinco sectores del modelo. El libro, escrito por Dennis L. Meadows y otros miembros del equipo original de

Los límites del crecimiento, lo distribuye Productivity Press, 2067 Massachusetts Avenue, 4th floor, P.O. Box 3007, Cambridge, MA 02140. Teléfono (617) 497 51 46, Telefax: (617) 868 35 24.

El software de simulación por ordenador

El modelo Wolrd3 fue inicialmente programado en el lenguaje DYNAMO, un lenguaje de simulación desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology específicamente para analizar modelos de dinámica de sistemas. Sigue siendo el lenguaje de elección para quienes trabajan sobre los *mainframes* (grandes ordenadores) o con los microordenadores compatibles IBM. Para este informe hemos traducido el modelo a una forma que puede ser simulada utilizando el STELLA.

Se pueden adquirir los compiladores de DYNAMO y STELLA de sus respectivos vendedores. El DYNAMO lo vende Pugh Roberts Inc., 41 William Linskey Way, Cambridge, MA 02142. Teléfono (617) 864 88 80. Telefax: (617) 661 74 18. El STELLA lo vende High Performance Systems Inc., 45 Lyme Road, Suite 300, Hanover, NH 03755. Teléfono: (603) 643 96 36. Telefax: (603) 643 95 02.

Un paquete que contiene un disco de ordenador con las ecuaciones del World3/91, formateado para utilizar con cada compilador, y una detallada lista de las modificaciones necesarias para producir cada uno de los escenarios de este libro puede adquirirse en Laboratory for Interactive Learning, Hood House, University of New Hampshire, Durham, NH 03824. Teléfono: (603) 862 21 86. Telefax: (603) 862 14 88.

Materiales pedagógicos complementarios

El Laboratory for Interactive Learning también ha publicado numerosos materiales pedagógicos relacionados con la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible. Entre estos materiales hay libros, juegos educativos y otros materiales que complementan directamente *Más allá de los límites del crecimiento* en la enseñanza. Se puede solicitar un folleto gratuito que incluye información sobre cada tema y otra información suplementaria.

NOTAS

INTRODUCCIÓN

[1] Donella H. Meadows et al., *Los límites del crecimiento* (Nueva York; Universe Books, 1972).

[2] Sí, hubo un World1 y también un World2. World1 fue el modelo prototipo desarrollado por primera vez por el profesor del MIT Jay Forrester en respuesta a la demanda del Club de Roma de interconexión entre las tendencias y problemas globales. World2 es el modelo final documentado de Forrester, descrito en Jay W. Forrester, *World Dynamics* (Cambridge; Wright-Allen Press, 1971), distribuido por Productivity Press. El modelo World3 fue desarrollado a partir del World2, fundamentalmente mediante el perfeccionamiento de su estructura y la ampliación de su banco de datos cuantitativo. Forrester es la base intelectual del modelo World3 y del método de sistemas dinámicos que se emplea para el modelo.

[3] También se hicieron dos libros técnicos: Dennis L. Meadows et al., *La dinámica del crecimiento en un mundo finito* (Cambridge; Wright-Allen Press, 1974), y Dennis L. Meadows y Donella H. Meadows, *Hacia el equilibrio global* (Cambridge; Wright-Allen Press, 1973). Ambos libros fueron distribuidos por Productivity Press. El primero es una documentación completa del modelo de ordenador World3; el segundo es una descripción de varios estudios auxiliares y submodelos hechos como insumos del modelo global.

[4] Los titulares corresponden respectivamente al *Star-Phoenix* de Saskatoon (Canadá), al *Plain Dealer* de Cleveland (EE UU) y al *Mainichi Daily News* de Tokio (Japón).

[5] *Límites,* pág. 24

[6] Thomas Varguish, "Por qué la persona que está a su lado odia *Los límites del crecimiento*", Technological Forecasting and Social Change 16 (1980): 179-189.

NOTAS SOBRE EL LENGUAJE

[7] Robert Goodland, Herman Daly, y Salah El Serafy, introducción a *Desarrollo económico en condiciones de sostenibilidad medioambiental: Construyendo en Brundtland.* Documento de trabajo sobre medio ambiente del Banco Mundial, núm. 46, julio de 1991, 2-3.

Capítulo 1

[8] Aurelio Peccei, *Cien páginas para el futuro* (Nueva York; Pergamon Press, 1981), 15. Peccei fue un líder de la industria italiana y el fundador del Club de Roma.

[9] A la comisión también se la conoce como Comisión Brundtland, por su presidenta, Gro Harlem Brundtland, primera ministra de Noruega. Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo, *Nuestro futuro común* (Oxford; Oxford University Press, 1987), 8.

Capítulo 2

[10] Thomas E. Lovejoy. Mensaje plenario a la reunión anual del American Institute of Biological Sciences, 14 de agosto de 1988. Lovejoy es ecólogo tropical y subsecretario de Asuntos Internacionales de la Smithsonian Institution.

[11] Este ejercicio está descrito en J. Scott Armstrong, *Long range forecasting* (New York; John Wiley & Sons, 1985), 102.

[12] Debemos a Robert Lattes este cuento. Si quiere experimentar por sí mismo el fenómeno de saturación repentina, intente comer un cacahuete el primer día del

mes, dos el segundo, cuatro el tercero, y así sucesivamente. ¡Trate de adivinar por adelantado qué día deberá abandonar este ejercicio!

[13] Population Reference Bureau, *Hoja de datos de la población mundial* (Washington D.C., 1991).

[14] Lester Brown, *Estado del mundo 1992* (Nueva York; W.W. Norton, 1992), 176.

[15] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), *El estado de la alimentación y la agricultura 1990* (Roma; Naciones Unidas, 1991), 14.

Capítulo 3

[16] Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo (en adelante citada como WCED), *Nuestro futuro común* (Oxford: Oxford University Press, 1987), 8.

[17] Herman Daly, "Hacia algunos principios operativos de desarrollo sostenible", *Ecological Economics,* 2 (1990):1-6.

[18] "Informe sobre el hambre" publicado anualmente por el Programa Mundial del Hambre Alan Shawn Feinstein. (Se puede obtener de la Universidad Brown, Box 1831, Providence, RI 02912).

[19] "El informe sobre el hambre 1991" (ver nota 18 más arriba).

[20] G.M. Higgins et al., *Capacidad potencial de soporte de las tierras para la población en el mundo en desarrollo* (Roma: FAO, 1982). Este estudio técnico está resumido en un informe no técnico de Paul Harrison, *Tierra, alimento y población*, FAO, Roma, 1984. El factor de multiplicación 16 está basado en previsiones muy optimistas, y sólo se puede aplicar a naciones en desarrollo, que comienzan desde un punto de muy bajo rendimiento. La FAO no ha hecho un estudio similar sobre la tierra de las naciones industrializadas.

[21] El alimento procedente del mar es aún más limitado que el procedente de la tierra, y su uso está próximo o más allá de sus límites, tal como se describe en el capítulo VI. Esquemas futuristas de alimentos no basados en la tierra —como levadura en tanques— serán marginales como fuentes de alimento, mayormente a causa de la energía y capitales que demandan. Los alimentos que no se producen primariamente en la tierra y mediante la fotosíntesis de la energía solar serán todavía menos sostenibles que el actual sistema de producción de alimentos.

22 Instituto de Recursos Mundiales, *Recursos Mundiales 1990-1991* (Nueva York y Oxford; Oxford University Press, 1990), 88.

23 Lester Brown, *Estado del mundo 1991* (Nueva York; W. W. Norton, 1991), 3.

24 WCED, 1987, op. cit., 125.

25 Naciones Unidas, Population Fund, *The State of the World Population 1990* (Nueva York; 1990), 10.

26 Ver, por ejemplo, Michael J. Dover y Lee M. Talbot, *Para alimentar a la tierra: Agro-Ecología para un desarrollo sostenible* (Washington D.C.; World Resources Institute, junio de 1987).

27 La literatura sobre agricultura "orgánica", de "bajo insumo" o "ecológica" es enorme. Para obtener información a escala mundial contacte con la International Federation of Organic Agricultural Movements, Ökozentrum Imsbach, W-6695, PholeyTheley, Alemania. Para ejemplos de granjas orgánicas estadounidenses, vea cualquier edición de *New Farm*, Rodale Press, Emmaus, PA. Para una revisión amplia de la agricultura orgánica en Estados Unidos, vea *Alternative Agriculture*, del U.S. National Research Council (Washington D.C.; National Academy Press, 1989).

28 Para un compendio de estos problemas y su potencial ver Pierre R. Crosson y Norman J. Rosenberg, "Estrategias para la agricultura", *Scientific American* (septiembre de 1989), 128.

29 De esta cantidad, unos 2.100 kilómetros cúbicos son retirados de la fuente y consumidos principalmente para el riego. Los restantes 1.400 kilómetros cúbicos son devueltos a los cursos de agua, habitualmente en forma de agua contaminada. Ver World Resources Institute, *Recursos mundiales 1990-91* (Nueva York y Oxford; Oxford University Press, 1990), 170.

30 La capacidad actual de las reservas de construcción humana es de alrededor de 6.000 kilómetros cúbicos, pero sólo la mitad de esa cantidad está disponible en forma de flujo sostenible. Para un resumen de un reciente informe ruso sobre las cuencas globales de almacenamiento de aguas, ver *World Resources 1990-91*, op. cit., 170.

31 El consumo de agua se ha ido incrementando entre un 3% y un 8% anual durante décadas, pero comienza a estabilizarse en las naciones industrializadas. El consumo en las zonas menos industrializadas se espera que prosiga con un crecimiento anual de entre el 2% y el 3%.

32 Para el análisis de algunos casos actuales ver Malin Falkenmark, "Aguas frescas como un factor en la política estratégica y acción", en Arthur H. Westing, ed., *Global Resources and International Conflict* (Oxford; Oxford University Press, 1986).

33 Ver, por ejemplo, Sandra Postel, "Saving water for agriculture" en Lester Brown, *Estado del mundo en 1990* (New York; W.W.Norton, 1990), 45-47; Jayanta Bandyopadhyay, "Riskfull confussion of drought and man-induced water scarcity", *Ambio* 18 (1989): 284-292; Danilo Anton, "Thirsty cities", *IDRC Reports* (octubre de 1990); Chandran Nair, "Bangkok's deteriorating Groundwater" (Ponencia presentada en la 14° Conferencia del WEDC, Kuala Lumpur, 1988).

34 Las estadísticas forestales citadas en esta sección han sido tomadas de Sandra Postel y John C. Ryan, "Reforming Forestry" en Lester Brown, *Estado del mundo en 1991* (Nueva York; W.W. Norton, 1991), 74-92; y de World Resources Institute, 1990, op. cit., 101-120.

35 Postel y Ryan, op. cit., 75.

36 International Institute of Applied Systems Analysis (desde ahora citado como IIASA), *Opciones* (Laxenburg, Austria; septiembre de 1990), 4.

37 IIASA, *Opciones*, op. cit., 11.

38 Postel y Ryan, op. cit., 88.

39 WCED, 1987, op. cit., 149.

40 Ver, por ejemplo, "Extinción: ¿están los ecologistas gritando cuidado con el lobo?" *Science* (18 de agosto de 1991), 736 —y otros artículos en la misma edición, que expresan las serias preocupaciones de los ecologistas.

41 Peter M. Vitousek *et al.*, "Apropiación humana de los productos de la fotosíntesis", *BioScience* 36 (1986), 368.

42 Se dice que Holanda "ocupa" entre 5 y 7 veces su propio territorio, principalmente a causa de las importaciones de piensos animales de países del Tercer Mundo. Ver Rijksinstiuut voor Volksgezondheit, en Milieuhygiene (en adelante citado como RIVM), *National Environmental Outlook, 1990-2010* (Bilthoven, Holanda: RIVM, 1991).

43 Por energía comercial se entiende aquella vendida en el mercado; no tiene en cuenta la energía utilizada por la gente que recoge madera, estiércol y otra biomasa para su propio uso. Las fuentes de energía no comercial son renovables en su mayor parte, aun cuando puede que no se exploten en forma sostenible. Suponen aproximadamente el 15% del consumo de energía de la población humana.

[44] Ged R. Davis, "Energía del planeta tierra", *Scientific American* (septiembre de 1990), 55.

[45] Citado en Christopher Flavin y Nicholas Lenssen, "Diseñando un sistema de energía sostenible", en Lester Brown, *Estado del mundo en 1991* (Nueva York; W.W. Norton, 1991), 21.

[46] "Producción" es una palabra engañosa para definir el proceso de extracción de combustibles fósiles de la tierra. La naturaleza es la productora de dichos combustibles, durante millones de años. Los seres humanos no los producen; los extraen, explotan, cosechan, bombean, o los toman. Sin embargo, producción es la palabra habitualmente utilizada, especialmente en términos como relación reserva/producción, motivo por el cual también debemos utilizarla.

[47] Desde luego que el capital destinado al descubrimiento, minería, bombeo, transporte y refino también quema combustibles. Si no hubiera otros límites, el límite último para el uso de los combustibles fósiles llegaría en el punto en el cual es necesaria tanta energía para encontrarlos como la que contienen. Ver Charles A. S. Hall y Cutler J. Cleveland, "Perforación petrolera y producción en Estados Unidos: análisis de rendimiento por esfuerzo y energía neta", *Science* (6 febrero 1981), 576.

[48] Para las reservas de gas ver H. J. M. de Vries, "El potencial de sustitución de dióxido de carbono de las reservas de metano y de uranio", en P. Oken, R. Swart, y S. Zwerver, editores, *Climate and Energy: The feasability of Controlling CO_2 Emissions* (Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 1989). Para los patrones de sobreestimación de reservas ver John D. Sterman, George P. Richardson y Päl Davidsen, "Modeling the estimation of Petroleum Resources in the United States", *Technological Forecasting and Social Change,* 33 (1988), 219-248.

[49] Esta información, y la mayor parte de los datos que se citan sobre este tema, provienen de Amory Lovins y del Rocky Mountain Institute. Para información más detallada sobre opciones de eficiencia energética en el transporte, industria y construcción, ver *Scientific American* (septiembre de 1990).

[50] Para una variedad de estimaciones, ver José Goldemberg *et al., Energy for a sustainable world* (Washington D.C.; World Resources Institute, 1987); *Energy 2000: A plan of action for sustainable development* (Ministerio de Energía de Dinamarca, abril de 1990); Amulya K. N. Reddy, "Estrategias energéticas para un desarrollo sostenible en la India" (Ponencia presentada en la conferencia Global Collaboration on a Sustainable Energy Development, Copenhagen, abril de 1991); Arnold P. Fickett, Clark W. Gellings y Amory Lovins, "Uso eficiente de la electricidad", *Scientific American* (septiembre de 1990), 64; M. Grubb *et al., Energy Policies and the Greenhouse Effect, Volume Two: Country Studies and Technical Options*, The Royal Institute of International Affairs (Worcester; Billings & Sons, Ltd., 1991).

[51] Para un resumen bien documentado, ver Christopher Flavin y Nicholas Lensson, "Designing a Sustainable Energy System", en Lester Brown, *State of the World 1991* (New York; W.W. Norton, 1991).

[52] Meridian Corporation, "Caracterización de los recursos energéticos y reservas de EE UU", preparado para el subsecretario de Energía Renovable, Alexandria, VA, junio de 1989; Idaho National Engineering Laboratory *et al.,* "The Potential of Renewable Energy: an Interlaboratory White Paper, prepared for the Office of Policy, Planning and Analysis, in support of the National Energy Strategy", Solar Energy Research Institute, 1990; EIA, *Annual Energy Review 1989* (Washington D.C., 1990).

[53] El sistema de almacenamiento más prometedor es el hidrógeno, formado a partir de la división de las moléculas de agua por la energía solar. El hidrógeno puede también ser la respuesta a la propulsión de vehículos en el futuro. Para una revisión del tema, ver Joan M. Ogden y Robert H. Williams, *Solar Hydrogen* (Washington D.C.; World Resources Institute, octubre 1989).

[54] Amory B. Lovins, *Openpit Mining* (Londres; Earth Island, 1973), 1.

[55] Para un examen sistemático de estas posibilidades, ver John E. Tilton, editor, *World Metal Demand* (Washington D.C.; Resources for the Future, 1990).

[56] Por ejemplo, la economía estadounidense en 1985 generó 187 millones de toneladas métricas municipales de residuos sólidos, 628 millones de toneladas de residuos industriales (265 de las cuales eran peligrosas), 72 millones de toneladas de desperdicios energéticos, 1.400 millones de toneladas de desperdicio agrícola, 1.300 millones de toneladas de desperdicios de la minería (excluyendo el carbón), 98 millones de toneladas de residuos de demolición, 8,4 millones de toneladas de residuos de desagües. Ver OCDE, *Environmental Data, Compendium 1989* (París, 1989), 155.

[57] La nanotecnología es el diseño y utilización de moléculas como máquinas, el armado de productos de una forma controlada, molécula por molécula, que es la forma en que son estructurados los seres vivientes. La biotecnología es un apartado especialmente sofisticado de la nanotecnología que se concentra en el diseño y uso de las moléculas de DNA. Para una descripción entusiasta de las posibilidades de la nanotecnología, ver K. Eric Drexler y Chris Peterson, *Desatando el futuro: La revolución nanotecnológica* (Nueva York; William Morrow, 1991). Ver también "Materials for Economic Growth", *Scientific American* (septiembre de 1986) y la edición especial de *Science* (29 de noviembre de 1991).

58 Earl Cook, "Limits to Exploitation of Nonrenewable Resources", *Science* (20 de febrero de 1976).

59 Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Francia, Alemania, Italia y Canadá.

60 Barry Commoner, *Making Peace with the Planet* (Nueva York; Pantheon Books, 1990).

61 California Air Resources Board, *Air Review* 3 (1991), 45.

62 I. F. Langeweg, *Concerns of Tomorrow* (Bilthoven, Holanda; RIVM, 1991).

63 *National Environmental Outlook 1990-2010* (Bilthoven, Holanda, RIVM, 1991).

64 WCED, 224.

65 WCED, 226.

66 *Nordic Environment,* 9 (septiembre de 1991), 2.

67 Ver William K. Stevens, "Northern Hemisphere Snow Cover found to Be Shrinking", *New York Times*, 30 de octubre de 1990, C4; "The Ghosts of Coral Past", *U.S. News and World Report*, 23 de septiembre de 1991; Keith Schneider, "Ranges of Animals and Plants Head North", *New York Times*, 13 de agosto de 1991, C1; *Science* (12 de octubre de 1990), 213.

68 Para un compendio cuidadoso de la opinión científica mundial sobre el cambio global del clima, reunido por varios centenares de científicos en activo de 25 naciones, ver World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment* (Cambridge; Cambridge University Press, 1990).

69 Estos datos proceden de perforaciones en el núcleo de hielo del continente antártico. La capa de hielo polar se ha acumulado durante milenios, capa tras capa, y en cada capa quedan atrapadas pequeñas burbujas de aire, preservadas desde los tiempos prehistóricos. El análisis isotópico puede datar la capa de hielo y dar claves de las temperaturas pasadas; el análisis directo de las burbujas permite medir la concentración de dióxido de carbono y de metano.

70 Ken Geiser, "The greening of Industry", *Technology Review* (Agosto/ Septiembre de 1991), 64.

71 Para una discusión extensa de la fórmula IPAT, ver Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich, *Healing the planet* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1991).

72 Hemos adaptado esta formulación de una propuesta originaria de Amory Lovins. Las estimaciones para la escala temporal y la amplitud para el cambio a largo plazo son suyas.

73 Lester Thurow, *Technology Review* (Agosto/Septiembre 1986). Thurow es el decano de la Sloan School of Management del MIT.

Capítulo 4

74 William R. Catton, Jr., *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change* (Urbana; University of Illinois Press, 1980).

75 La capacidad de sustentación es el tamaño de población que puede ser sostenido indefinidamente por el medio ambiente. El concepto de capacidad de sustentación fue definido originariamente para sistemas de población/recursos relativamente simples, como el número de ovejas o vacas que pueden ser mantenidas en una superficie dada de tierras de pastoreo sin degradar el suelo. Para la población humana el término "capacidad de sustentación" es mucho más complejo a causa de los muchos tipos de recursos que la gente toma del medio, los diversos tipos de residuos que devuelven, y la gran variabilidad de tecnologías, instituciones y estilos de vida. La capacidad de sustentación es un concepto dinámico. Una capacidad de sustentación no es constante; está siempre cambiando con el clima y otros modificadores externos, y con la presión que ejercen las especies que son sustentadas.

76 Ver, por ejemplo, R. Boyd, "World Dynamics, a Note", *Science* (11 de agosto de 1972); T. W. Oerlemans *et al.*, "World Dynamics: Social Feedback May Give Hope for the Future", *Nature* 238 (4 de agosto de 1972); H. S. D. Cole *et al.*, *Models of Doom* (Nueva York; Universe Books, 1973).

77 Sören Jensen, *New Scientist,* 32 (1966): 612.

78 Environment Canada, Departamento de Pesca y Océanos, "Toxic Chemicals in the Great Lakes and Associated Effects, Vol. I. Contaminant levels and trends", marzo de 1991.

79 E. Dewailly *et al.*, "High levels of PCBs in Breast Milk of Inuit Women from Arctic Quebec", *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 43 (1989): 641-646.

80 P. J. H. Reijnders, "Fracaso reproductivo de las focas comunes que se alimentan de peces de las aguas costeras contaminadas", *Nature*, 324 (4 de diciembre de 1986): 456.

[81] J. P. Marquenie y P. J. H. Reijnders, "Global Impact of PCBs with special reference to the Arctic" (Proceedings of the 8th. International Congress of Comite Arctique Internationale, Oslo, 18-22 de septiembre, 1989, NILU, Lillestrom, Noruega).

[82] WCED, *Our common Future* (Oxford; Oxford University Press, 1987): 102.

[83] Ver "New Causes of Concern on Global Warming", *New York Times*, 12 de febrero de 1991, C6.

[84] W. M. Stagliani, "Bombas de tiempo químicas", *Options* (Laxenberg, Austria; IIASA, septiembre de 1991): 9.

[85] La producción industrial *per cápita* es el indicador más importante del nivel material de vida en este modelo. Un valor de 260 como producto industrial *per cápita* corresponde, a grandes rasgos —pero sólo a grandes rasgos—, con un PIB por persona de en torno a los 3.500 dólares, aproximadamente el promedio mundial de 1990. Las proyecciones de World3 para el producto industrial *per cápita* no pueden transformarse directamente en el PIB por persona por varias razones. Una de ellas es que representa productos físicos, como coches, viviendas y refrigeradores, y por lo tanto no se lo puede deflactar como se hace con las mediciones basadas en el dinero. Otra es que la fracción industrial del PIB cambia con el nivel de desarrollo. A medida que se eleva el PIB por persona, la producción industrial representa al principio una fracción creciente, y luego una fracción decreciente a medida que la producción de servicios crece más rápidamente. Finalmente, las unidades de producción industrial *per cápita* que se han calculado en el modelo están expresadas en dólares con base de referencia en la economía global de 1970, cuando desarrollamos las ecuaciones por primera vez.

Capítulo 5

[86] Office of Air and Radiation, U. S. Environmental Protection Agency, *Assessing the Risks of Trace Gases in the Earth's Atmosphere*, Vol III. (Washington, DC; Government Printing Office, diciembre de 1987).

[87] Richard S. Stolarski y Ralph J. Cicerone, "Stratospheric Chlorine: A possible sink for Ozone", *Canadian Journal of Chemistry,* 52 (1974): 1610.

[88] Mario J. Molina y F. Sherwood Rowland, "Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atomic Catalysed Destruction of Ozone", *Nature* 249 (1974): 810.

[89] Citado en Richard E. Benedick, *Ozone Diplomacy* (Cambridge: Harvard University Press, 1991): 12.

[90] J. C. Farman, B. G. Gardiner y J. D. Shanklin, "Grandes pérdidas del Oozono total en la Antártida revelan la interacción estacional de ClO/NO_2", *Nature* 315 (1985): 207.

[91] El periodo durante el cual los científicos encontraron las bajas mediciones de ozono sin "verlas" está bien descrito en Paul Brodeur, obra citada, 1986, 71.

[92] J. G. Anderson, W. H. Brune y M. J. Proffitt, "Ozone Destruction by Chlorine Radicals within the Antarctic Vortex: The Spatial and Temporal Evolution of $ClO-O_3$ Anticorrelation Based on in situ ER-2 Data", *Journal of Geophysical Research,* 94 (30 de agosto de 1989): 11, 474.

[93] Mario J. Molina, "The Antarctic Ozone Hole", *Oceanus* 31 (verano de 1988).

[94] Du Pont abandonó su investigación de sustitutos de CFC al ser elegido Ronald Reagan para la presidencia de Estados Unidos en 1980.

[95] El proceso político está descrito clara y extensamente por Richard Benedick, quien fue el negociador jefe de Estados Unidos, en *Ozone Diplomacy*, op. cit., 1990.

[96] Mario J. Molina, "Stratospheric Ozone: Current Concerns" (Ponencia presentada ante el Simposio sobre Química del Medio Ambiente Global-Retos e Iniciativas, 198 Encuentro Nacional de la Sociedad Química Americana, septiembre 10-15 de 1989, Miami Beach, Florida). Molina fue autor, con F. Sherwood Rowland, de una de las primeras ponencias científicas prediciendo el agotamiento de la capa de ozono.

[97] The Industrial Coalition for Ozone Layer Protection, 1440 New York Avenue NW, Suite 300, Washington, DC 20005.

[98] William K. Stevens, "Summertime Harm to Shield of Ozone Detected Over U. S.", *New York Times*, 23 de octubre de 1991, 1.

Capítulo 6

[99] Stewart L. Udall y William R. Catton, Jr., *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change* (Urbana; University of Illinois Press, 1980), xv. Udall fue parlamentario del Congreso de EE UU y Secretario de Interior.

[100] Jeremy Bray, *Environment* 14 (mayo de 1972): 44.

[101] Julian Simon y Herman Kahn, *The Resourceful Earth* (Oxford; Basil Blackwell, Ltd., 1984): 3.

[102] Un pequeño recordatorio para nosotros del maravilloso poder de los avances tecnológicos es que estamos escribiendo este libro, utilizando el modelo World3, preparando gráficos y tablas, y maquetando las páginas, en ordenadores de mesa y portátiles. Hace veinte años, cuando escribimos *Los límites del crecimiento*, lo hicimos en máquinas de escribir eléctricas, dibujamos los gráficos a mano, y debimos usar un gran ordenador para poder hacer funcionar el World3.

[103] Para una exploración particularmente razonada de la tecnología ver C. S. Lewis, "The Abolition of Man", en Herman Daly, *Towards a Steady-State Economy* (San Francisco; Freeman Press, 1973): 321.

[104] Incorporamos ese supuesto en 1970, y luego implantamos esas tecnologías en la simulación del año 1975. Para el año real de 1990 algunas de ellas han comenzado a ser incorporadas estructuralmente a la economía mundial. Por lo tanto hemos hecho algunos ajustes a las cifras en el World3 —por ejemplo, hemos reducido significativamente la utilización de recursos por unidad de producto industrial—. Estos cambios numéricos se explican en el *Apéndice*. Se encuentran presentes de hecho en todos los ensayos de ordenador con el modelo que se incluyen en este libro. En el modelo se implantan algunas reducciones aún mayores en el uso de recursos y la emisión de contaminantes a través de tecnologías *"turn-on"*, descritas más arriba y explicadas en este capítulo.

[105] Dianne Dumanoski, "Study by the Northeast Fisheries Center Warns That the Level of Cod on the Georges Bank Has Dropped and Is Heading for a Major Collapse", *Boston Globe*, 5 de noviembre de 1988, 1.

[106] Para la producción de las áreas pesqueras ver FAO, *Yearbook of Fisheries Statistics: Catches and Landings* (Roma; Naciones Unidas, publicación anual); para estimaciones de una captura sostenible ver M. A. Robinson, *Trends and Prospects in World Fisheries* (Roma; FAO, 1984).

[107] *New York Times*, 16 de julio de 1991, C4.

[108] Los datos sobre el atún y el camarón provienen de *Audubon* (septiembre/octubre de 1991): 34, 44.

[109] John Kurien y T. R. Thankapan Achari, "Overfishing along Kerala Coast: Causes and Consequences", *Economic and Political Weekly* (1-8 septiembre de 1990).

[110] J. F. Caddy y R. C. Griffiths, "Recent Trends in the Fisheries and Environment in the General Fisheries Council for the Mediterranean Area"; FAO, *Studies and Reviews: General Fisheries Council for the Mediterranean,* 63 (Roma; Naciones Unidas, 1990).

[111] Lawrence Ingrassia, "Dead in the Water: Overfishing Threatens to Wipe Out Species and Crush Industry", *Wall Street Journal*, 16 de julio de 1991, 1.

[112] El análisis clásico de este fenómeno es el artículo de Garrett Hardin "The Tragedy of Commons", *Science* (3 de diciembre de 1968): 1243.

[113] Carl Safina, National Audubon Society, comunicación personal.

[114] Paul Lunven, "El papel del pescado en la nutrición humana", *Food and Nutrition,* 8 (1982): 9-18.

[115] Paul Ehrlich, en R. J. Hoage, ed., *Animal Extinction: What everyone Should Know* (Washington, DC; Smithsonian Institution Press, 1985), 163.

[116] *Nordic Environment,* 9 (septiembre de 1991).

Capítulo 7

[117] Herman E. Daly, "Towards a Stationary-State Economy", en John Harte y Robert Socolow, *Patient Earth* (Nueva York; Holt, Rinehart and Winston, 1971): 237.

[118] WCED, *Our Common Future*, obra citada.

[119] Herman Daly es una de las pocas personas que han comenzado a pensar qué tipo de instituciones sociales pueden trabajar al servicio de un nivel deseable de sostenibilidad. Ha planteado para este fin una serie de mecanismos de mercado y de regulación que invitan a una reflexión. Ver, por ejemplo, Herman Daly, "Institutions for a Steady-State Economy", en *Steady State Economics* (Washington D.C.; Island Press, 1991).

[120] Aurelio Peccei, *The Human Quality* (Oxford; Pergamon Press, 1977), 85.

[121] John Stuart Mill, *Principios de Economía Política*, editado por primera vez en 1848.

[122] Para un ejemplo de "contabilidad sostenible" ver Raúl Solórzano *et al., Accounts overdue: Natural resources depreciation in Costa Rica* (Washington D.C.; World Resources Institute, diciembre de 1991).

[123] Lewis Mumford, *The condition of Man* (New York; Harcourt Brace Jovanovich, 1944): 398-99.

Capítulo 8

[124] William D. Ruckelshaus, "Towards a sustainable World", *Scientific American* (septiembre de 1989): 167. Ruckelshaus fue el administrador de la Agencia Estadounidense para la Protección del Medio Ambiente bajo la presidencia de Richard Nixon, y regresó al mismo cargo bajo la presidencia de Ronald Reagan. Fue miembro de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo. En la actualidad es alto ejecutivo de Browning Ferris Industries, Inc.

[125] Este sentido de revolución milenarista está en el aire. La cita de Ruckelshaus que encabeza este capítulo es sólo un ejemplo del coloquialismo revolucionario que comienza a penetrar en el discurso público. Ver también la serie de televisión WGBH-TV "Race to Save the Planet", Alexander King y Bernard Schneider, *The first global revolution* (Nueva York; Pantheon Books, 1991), y Lester Brown, *State of the World 1992* (Nueva York; W.W. Norton, 1992).

[126] Donald Worster, ed., *The Ends of the Earth* (Cambridge; Cambridge University Press, 1988): 11-12.

[127] Ralph Waldo Emerson, "War" (Conferencia dada en Boston, marzo de 1838). Reeditado en *Emerson's Complete Works*, vol. XI (Boston; Houghton, Mifflin & Co. 1887), 177.

[128] Para una descripción completa de cómo un mundo con estos rasgos podría desarrollarse en realidad, ver Dennis L. Meadows, ed., *Alternative to Growth-I* (Cambridge; Ballinger, 1977). Distribuido por Heronbrook Publications, P.O.Box 844, Durham, NH 03824.

[129] Para una exploración de este tipo de economía, ver Herman Daly y John Cobb, *For the Common Good* (Boston; Beacon Press, 1989).

[130] R. Buckminster Fuller, *Critical Path* (Nueva York; San Martin's Press, 1981).

[131] Abraham Maslow, *The Farthest Reaches of Human Nature* (New York; Viking Press, 1971).

[132] J. M. Keynes, prefacio a *Essays on Persuassion* (New York; Harcourt, Brace and Company, 1932).

[133] Aurelio Peccei, *One hundred pages for the future* (New York; Pergamon Press, 1981): 184-85.

APÉNDICE

[134] Etienne van de Walle, "Foundations of the Model of Doom", *Science* (26 de septiembre de 1975): 1077-1078.

[135] Dennis L. Meadows *et al., Dynamics of Growth in a Finite World* (Cambridge; Wright-Allen Press, 1974). Distribuido por Productivity Press.

[136] Alexander L. Pugh, II, *DYNAMO User's Manual*, 5ª ed. (Cambridge; MIT Press, 1976). George P. Richardson y Alexander L. Pugh, III, *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO* (Cambridge; MIT Press, 1981). Ambos libros distribuidos por Productivity Press.

[137] Barry Richmond *et al., STELLA for Business* (Hanover, NH; High Performance Systems, 1987).

BIBLIOGRAFÍA ANOTADA

Acerca del método de dinámica de sistemas y programas de simulación por ordenador

Bossel, Hartmut. Systemdynamik: *Grundwissen, Methoden, un BASIC-Programme zur Simulation Dynamischer Systeme.* Braunschweig: Friederich Vieweg & Sohn, 1987. Un texto introductorio a la modelización mediante la dinámica de sistemas utilizando el lenguaje de programación BASIC.

— *Emweltdynamik.* Munich: te-wi Verlag Gmbh, 1985. Aplicación de dinámica de sistemas a sistemas de recursos y de medio ambiente.

Forrester, Jay W. *Principles of Systems.* Cambridge: Wright-Allen Press, 1968. Distribuido por Productivity Press, P.O. Box 30007, Cambridge, MA 02140 (tel: (800) 274 99 11). El libro de texto original de dinámica de sistemas.

— *Industrial Dynamics.* Cambridge: Wright-Allen Press, 1961. Distribuido por Productivity Press. El libro fundacional de este campo, y todavía un clásico, que cimentó los métodos básicos y principios de sistemas con ejemplos de los sistemas industriales.

Randers, Jörgen, ed. *Elements of the System Dynamics Method.* Cambridge: MIT Press, 1980. Distribuido por Productivity Press. Una colección de trabajos por expertos en dinámica de sistemas, quienes detallan la filosofía y los paradigmas en este campo, sus principales métodos, y cómo maneja complejos temas de modelización como la validación e implementación.

Richardson, George P., y Alexander L. Pugh, III. *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO.* Cambridge: MIT Press, 1981. Distribuido por Productivity Press. Un libro de texto que introduce a los principios básicos y técnicas de la aproximación desde la dinámica de sistemas. Es especialmente fuerte en su debate de las habilidades prácticas para conceptualizar, depurar y probar modelos.

Roberts, Nancy, y colaboradores. *Introduction to Computer Simulation, A Systems Dynamics Modeling Approach.* Reading, MA: Addison-Wesley, 1983. Un texto introductorio con un lenguaje claro y muchos ejemplos ilustrativos y ejercicios para estudiantes. El libro pone énfasis en los aspectos teóricos, y la representación gráfica y numérica de las relaciones de retroalimentación.

Senge, Peter. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of Learning Organization.* New York: Doubleday, 1990. Aplicaciones al pensamiento de sistemas (y de otras formas de pensamiento que amplían la capacidad de entendimiento) al campo de la gestión de empresas.

The System Dynamics Review, se puede obtener de la System Dynamics Society, MIT E40-294, Cambridge, MA 02139. La revista profesional del campo de la dinámica de sistemas.

Sobre modelización de sistemas sociales de gran escala

Barney, Gerald O., y colaboradores. *Managing a Nation, The Microcomputer Software Catalog,* 2ª ed. Boulder, CO: Westview Press, 1991. La fuente definitiva para cualquiera que desee empezar en un programa de enseñanza o investigación que involucre modelos a escala nacional o global. El texto aporta información accesible de programas de microordenador disponibles que ayudan en la representación y simulación de importantes sectores de la economía nacional. Capítulos sobre modelos, juegos, y simulaciones relacionadas con la agricultura, demografía, economía, y otras siete áreas son el punto de partida del libro. También hay

capítulos sobre modelos nacionales multisectoriales y varios modelos globales. Finalmente una sección de documentación, publicaciones, lenguajes de modelos, y principios de la modelización brindan tanto al principiante como al modelizador avanzado acceso a una gran riqueza de herramientas.

Forrester, Jay W. *World Dynamics.* Cambridge: Wright-Allen Press, 1971. Distribuido por Productivity Press. Una descripción soberbiamente documentada del modelo World2, el predecesor de World3, escrito por el fundador del método de la dinámica de sistemas.

Meadows, Dennis L., y colaboradores. *Dynamics of Growth in a Finite World.* Cambridge: Wright-Allen Press, 1974. Distribuido por Productivity Press. Una descripción técnica detallada del modelo de ordenador World3. Los objetivos, los paradigmas subyacentes, datos empíricos, y ecuaciones DYNAMO involucradas en la construcción del modelo se exponen en detalle.

— y Donella H. Meadows. *Toward Global Equilibrium,* Collected Papers. Cambridge: Wright-Allen Press, 1973. Distribuido por Productivity Press. Una recolección de 13 ponencias escritas por miembros del System Dinamics Group de la MIT Sloan School of Management para explorar la naturaleza e implicancias del crecimiento físico en un planeta finito. Ocho de los capítulos presentan modelos de dinámica de sistemas en el lenguaje DYNAMO que fueron creados para explorar temas de contaminación, agotamiento de recursos, y crecimiento de la población en la preparación del World3.

Meadows, Donella H., John Richardson y Gerhart Bruckmann. *Groping in the Dark, The First Decade of Global Modeling.* Nueva York: John Wiley & Sons, 1981. Este libro ha sido fruto de una serie de conferencias sobre modelización organizadas por el International Institute for Applied Systems Analys de Laxenburg, Austria, entre abril de 1974 y septiembre de 1977. Compara siete de los principales modelos globales, comenzando por el World3, y explora lo que se sabe y lo que se puede llegar a saber sobre el futuro a largo plazo de los sistemas globales a través de la investigación con este tipo de modelos.

— y Jennifer M. Robinson. *The Electronic Oracle, Computer Models and Social Decisions.* Nueva York: John Wiley & Sons, 1985. El núcleo de este libro está formado por la descripción de nueve importantes modelos socioeconómicos. Se describen los principales métodos de modelización: dinámica de sistemas, econometría, análisis *input-*

output, y programación lineal, y hay tres capítulos que examinan la fuerza y limitaciones de los modelos formales de análisis de políticas. El libro concluye con dos capítulos que se refieren a medios de realzar la calidad, consistencia, objetividad, y utilidad de estos grandes modelos.

Sobre información estadística acerca del estado del mundo

Las siguientes publicaciones se editan anualmente o cada dos años. Estamos suscriptos a todas ellas (o a más) y las mantenemos a mano como referencias en nuestro trabajo.

Brown, Lester, y colaboradores. *State of the World.* New York: W.W.Norton, publicación anual. Un informe legible y basado en buena investigación que se centra cada año en un grupo de temas relacionados con la sostenibilidad. Agricultura, Energía, gestión de residuos, población, transporte,y agua son temas frecuentes.

Population Reference Bureau, "World Population Data Sheet", se puede obtener de PRM, 777 Fourteenth Street NW, Suite 800, Washington, DC 20005. Un gráfico de pared que resume anualmente los datos demográficos más recientes (población, tasasa de natalidad y mortandad, mortandad infantil, etc.) para todas las naciones del mundo.

Sivard, Ruth Leger. *World Military and Social Expenditures.* Se puede obtener de World Priorities, Box 25140, Washington, DC 20007. Un sorprendente informe anual que compara la inversión en armas con las inversiones en educación, asistencia sanitaria, y desarrollo económico.

FAO. *The State of Food and Agriculture.* Roma: Naciones Unidas.

UNEP. *Environmental Data Report.* Oxford: Basil Blackwell, Ltd., publicación anual.

UNFPA. *The State of World Population.* United Nations Population Fund, 220 East 42nd Street, New York, NY 10017.

UNICEF. *The State of the World's Children.* New York: Oxford University Press. Estos informes anuales de las Naciones Unidas contienen además de los datos mundiales, análisis de cómo las agencias de la ONU interpretan esos datos y cuáles son sus agendas políticas primarias.

World Resources Institute. *World Resources.* Nueva York: Oxford University Press. El informe World Resources (Recursos Mundiales) es de publicación bianual. Tiene información completa sobre el estado de la población y la salud, asentamientos humanos, alimentación y agricultura, bosques y zonas salvajes, vida animal, energía, agua, atmósfera, etc., y publica además revisiones de temas específicos, como los cambios de clima o la restauración del ecosistema.

Acerca de la sociedad sostenible

No podemos dar aquí un listado completo de las excelentes publicaciones sobre filosofía, política, economía, demografía, energía y agricultura, de un mundo sostenible. Damos una relación de pocas obras, algunas de las más importantes y algunas de las más recientes. Alentamos al lector a sumergirse en cualquier punto de este vívido debate. Estos libros les conducirán a otros.

Benedick, Richard Eliot. *Ozone Diplomacy: New Directions in Safeguarding the Planet.* Cambridge: Harvard University Press, 1991. La historia de la capa de ozono desde las primeras ponencias científicas hasta el acuerdo de Londres, escrito por uno de los principales negociadores estadounidenses. Una importante pieza de historia para comprender, como preparación para los futuros acuerdos globales destinados a hacer frente a los problemas de contaminación a una escala global.

Berry, Thomas. *The Dream of Earth.* San Francisco: Sierra Club Books, 1988. Thomas Berry es un visionario y teólogo que habla y escribe sobre "una forma viable de la presencia humana sobre la tierra". Esta es una recopilación de ensayos nobles e inspirados, que desarrolla una nueva "historia" del papel humano en el universo —una que es congruente con las antiguas religiones, con la ciencia moderna y con una sociedad sostenible.

Berry, Wendell. *Home Economics.* San Francisco: North Point Press, 1987. Wendell Berry es un poeta, novelista y agricultor. Favorece especialmente la parte de "acción local" del axioma ecológico "Piense globalmente, actúe localmente". Sus escritos son incisivos, críticos, basados en la buena administración y en la buena comunidad humana. Es un

buen libro para comenzar, pero cualquier obra de Wendell Berry es una contribución a la forma de pensar que permitirá la materialización de una sociedad sostenible y satisfactoria.

Clark, Mary E. *Ariadne's Thread: The Search of New Modes of Thinking.* New York: St. Martin's Press, 1989. Un libro amplio y valiente que surgió de un curso universitario sobre el futuro global enseñado desde 15 distintas disciplinas en la San Diego State University. El libro explora un nuevo pensamiento hacia la sostenibilidad, no sólo en energía, ecología y economía, sino también en psicología, antropología, religión y gobierno.

Daly, Herman. *Steady-State Economics,* Washington D.C.: Island Press, 1991. Una recopilación de ensayos por el máximo teórico de la economía de la sociedad sostenible. Fácil de leer, escrito para la mayoría del público en general, y verdaderamente provocador en cuanto a generar pensamiento.

Daly, Herman, y John Cobb. *For the Common Good.* Boston: Beacon Press, 1989. Un libro más técnico y denso que el que acabamos de detallar, escrito para gente familiarizada con el lenguaje de la economía profesional. Analiza en profundidad las razones por las cuales la teoría económica contemporánea no hace frente a los requisitos de un sistema único tanto de la sociedad humana como del medio ambiente, y, sin descartar los logros de la economía moderna, comienza a sentar los fundamentos para los añadidos y correcciones que establecerán la más completa economía de comunidad y sostenibilidad.

Ehrlich, Paul R., y Anne H. Ehrlich. *Healing the Planet.* Reading, MA: Addison-Wesley, 1991. Este equipo de marido y mujer se ha dedicado a documentar problemas globales y a señalar soluciones desde hace décadas. Su última obra es un resumen completo y legible de como leer las señales de peligro que emite el planeta y qué tipo de acciones pueden restablecer al sistema planetario y asegurar el futuro humano.

Gever, John, Robert Kaufmann, David Skole, y Charles Vorosmarty. *Beyond Oil: The Threat to Food and Fuel in the Coming Ages.* Cambridge: Ballinger, 1986. Un análisis fascinante del grado al cual Estados Unidos se está acercando o ha excedido su capacidad de transporte, especialmente en lo que respecta a energía y agricultura. El estudio se basa en el uso arduo de datos y en modelos de ordenador.

IUCN, UNEP, WWF. *Caring for the Earth: A Strategy for Sustainable Living.* London: Earthscan Publications, 1991. Un compendio de principios y acciones para una vida sostenible, basado en la World Conservation Strategy, publicado en 1980 por las mismas organizaciones internacionales. Un excelente resumen del estado del pensamiento global sobre la naturaleza de la sociedad sostenible y los pasos necesarios para materializarla.

Lovelock, J. E. Gaia: *A New Look at Life on Earth.* Oxford: Oxford University Press, 1979. Una hipótesis controvertida y generadora de ideas acerca de la tierra como sistema único. Ha desarrollado, de un lado, un campo de investigación científica seria acerca de los sistemas de la tierra y, por otra parte, una nueva religión que adora a la tierra como un ser, y una diosa.

Lovins, Amory B. Soft Energy Paths. Cambridge: Ballinger, 1977. El libro que introdujo los conceptos centrales de un sistema de energía para un mundo sostenible. Las cifras incluidas en este libro están ahora desactualizadas —las mejoras tecnológicas han hecho ahora las posibilidades de la energía suave mucho más factibles y económicamente favorables de lo que parecían en 1977. Pero los argumentos siguen siendo válidos, y el libro sigue siendo un clásico.

Mathews, Jessica Tuchman, ed., *Preserving the Global Environment: The Challenge of Shared Leadership.* New York: W.W.Norton, 1991. Ensayos políticos acerca de algunos de los principales pensadores en el área de población, deforestación, energía, economía, regulación y cooperación internacional.

Meadows, Dennis L., ed., *Alternatives to Growth-I.* Cambridge: Ballinger, 1977. Distribuido por Heronbrook Publications, P.O.Box 844, Durham, NH 03824. En este libro 17 capítulos describen las formas en que la sociedad puede existir en armonía con los límites al crecimiento del planeta. Cuatro secciones del libro se centran en "Nutrición y energía en el estado estable", "alternativas económicas en la era de los límites", "Las políticas de equidad y progreso social en un mundo finito", y "Estilos de vida y normas sociales para un estado sostenible". El libro presenta las ponencias ganadoras del concurso internacional George y Cynthia Mitchell sobre un futuro sostenible.

Meadows, Donella H. *The Global Citizen.* Washington DC: Island Press, 1991. Una recopilación de artículos en periódicos escritos entre 1985 y 1990 sobre temas vinculados al crecimiento, límites y sostenibilidad. Los temas van desde el estilo de vida personal hasta la política global, desde temas específicos de energía, agricultura, eliminación de resi-

duos, y control de contaminación hasta la preocupación por el liderazgo, la ética y el desarrollo de visiones. Hay una preocupación especial por incluir casos de estudios que representan "buenas nuevas".

Milbrath, Lester W. *Envisioning a Sustainable Society.* Albany: State University of New York Press, 1989. Una descripción detallada de una sociedad sostenible, hasta donde se la puede prever en la actualidad, poniendo el énfasis en que no puede ser plenamente imaginada en la actualidad, y tampoco puede dictarse a la sociedad —requerirá, sobre todo, aprendizaje.

Orr, David W. *Ecological Literacy.* Albany: State University Press of New York, 1992. Esta recopilación de penetrantes ensayos acerca del tipo de educación necesaria para la sostenibilidad contiene además una lista de lecturas "sobre la sostenibilidad" más completa que la que se puede incluir aquí.

Sagoff, Mark. *The Economy of the Earth.* Cambridge: Cambridge University Press, 1988. La crítica de un filósofo a la sociedad del bienestar. Pensamiento sobre ética, política, legislación y economía, como si la tierra importara.

Schumacher, E. F. *Small is Beatiful.* New York: Harper & Row, 1973. Una obra clásica del pensamiento claro sobre la pobreza y el desarrollo, economía en general y economía de recursos en particular, enlazada por una hebra bienvenida de desprendimiento filosófico y compromiso moral.

Swimme, Brian. *The Universe is a Green Dragon.* Santa Fe: Bear and Company, 1984. Una bella interpretación de las enseñanzas de Thomas Berry; una nueva historia y una nueva visión del papel de la humanidad sobre la tierra y en el universo.

Wilson, E.O., ed., *Biodiversity.* Washington DC: National Academy Press, 1988. Una colección de ponencias escritas por muchos de los expertos mundiales en biodiversidad para un Foro Nacional sobre Biodiversidad, auspiciado por la Academia Nacional de Ciencias y la Smithsonian Institution. Si quiere saber qué ven los ecologistas cuando monitorizan los ecosistemas del mundo y cómo se sienten por ello, este es un excelente volumen para leer.

Woodwell, George, ed., *The Earth in Transition: Patterns and Processes of Biotic Impoverishment.* Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Otra recopilación de ponencias de un congreso de ecologistas de campo, efectuado aproximadamente en la misma época que el Foro Nacional recién descripto. Las ponencias de este volumen son en su conjunto más largas y más académicas que las del libro editado por Wilson. Juntas suman una sorprendente documentación acerca de la erosión de los recursos bióticos en cada lugar de la tierra, desde la tundra hasta la selva tropical, desde los arrecifes de coral hasta los lagos de Canadá, y desde la gran cuenca del Oeste de Estados Unidos hasta las selvas de eucaliptus de Australia.

World Commission on Environment and Development. *Our Common Future.* Oxford: Oxford University Press, 1987. Este es el informe del prestigioso panel internacional que efectuó un estudio de dos años y recogió testimonios en todo el mundo acerca de temas de medio ambiente y desarrollo. Las dos contribuciones primarias de este estudio fueron la definición y popularización de la idea de sostenibilidad y el fuerte vínculo entre los temas de medio ambiente y desarrollo. El libro está plagado de datos interesantes y también de citas agudas de personas que testimoniaron durante las audiencias.

Algunas obras del y para el Club de Roma

Grupos de investigadores comisionados por el Club de Roma han hecho innumerables informes para él, al igual que se nos comisionó a nosotros hace veinte años para investigar algunos aspectos de lo que el Club denomina la "problemática global". Unos pocos libros han sido escritos por el Club de Roma o por algunos de sus miembros más prominentes en nombre del Club. Algunos de los ejemplos más recientes e importantes de los últimos que hemos señalado se detallan aquí.

King, Alexander, y Bertrand Schneider. *The First Global Revolution.* New York: Pantheon Books, 1991. From the Problematique to the Resolutique. Un "incunable para el siglo XXI" por el Consejo del Club de Roma.

Peccei, Aurelio. *The Human Quality.* Oxford: Pergamon Press, 1977. En el primer capítulo de este libro el fundador del Club de Roma escribe una breve autobiografía, que es un testamento a la nobleza de la raza humana, y una atractiva historia de un hombre que experimentó todo desde las cámaras de tortura fascistas hasta las salas de consejo de las grandes corporaciones. El resto del libro es su versión de

la fundación del Club de Roma, de la preparación de *Los límites del crecimiento,* y de la revolución humana que creía que era tan necesaria como posible.

Peccei, Aurelio. *One Hundred Pages for the Future.* New York: Pergamon Press, 1981. Menos personal que *The Human Quality,* más centrado en el estado del mundo y en qué hacer con él. Peccei señala en forma consistente que las soluciones a los problemas del mundo se deben encontrar dentro de nosotros mismos.

Peccei, Aurelio, y Daisaku Ikeda. *Before It Is Too Late.* Tokyo: Kodansha International, 1984. Una conversación sobre temas globales entre el fundador del Club de Roma y un líder budista no religioso. Esta fue la última publicación de Aurelio Peccei antes de su muerte en 1984.

Pestel, Eduard. *Beyond the Limits of Growth.* New York: Universe Books, 1989. Otro miembro de los comienzos del Club de Roma, también dedicado a la modelización global, ha escrito sus memorias de las actividades del Club y despliega su punto de vista de hacia dónde ir desde aquí.

GLOSARIO DE TÉRMINOS DE SISTEMAS

bucle de retroalimentación: Una cadena cerrada de conexiones causales. En general, los bucles de retroalimentación proceden de un *stock*, a través de una serie de decisiones o acciones dependientes de la condición de ese *stock*, y de nuevo modificando a ese *stock*.

bucle de retroalimentación positiva: Una cadena de relaciones causa-efecto que se cierra sobre sí misma de forma tal que un incremento en cualquiera de los elementos de la cadena iniciará una secuencia de cambios que aumentará aún más el elemento original. Un ciclo positivo puede ser un "círculo vicioso" o un "círculo virtuoso", dependiendo de que el crecimiento que genera sea deseado o no.

bucle de retroalimentación negativa: Una cadena de relaciones causa-efecto que propaga un cambio en uno de los elementos de un ciclo causal, hasta que la onda regresa modificando ese elemento en una dirección opuesta al cambio inicial. Mientras que los bucles positivos generan un crecimiento desmesurado, los negativos tienden a regular el crecimiento, a mantener un sistema dentro de una amplitud aceptable, o a hacerlo regresar a un estado estable.

colapso: Una caída descontrolada de la población o la economía provocada cuando esa población o esa economía sobrepasa los límites sostenibles por su medio ambiente y en el proceso reduce o erosiona dichos límites. La posibilidad de colapso se ve especialmente facilitada cuando hay bucles de erosión positivos, de forma tal que una degradación del medio ambiente pone en movimiento procesos que acentúan su degradación.

comportamiento: El comportamiento de un sistema sobre la variable tiempo-crecimiento, equilibrio estable, oscilación, declinación, aleatoriedad, evolución, caos, o cualquier combinación compleja de estos comportamientos.

crecimiento exponencial: Crecimiento en una fracción constante de la cantidad en incremento durante un periodo de tiempo constante. El dinero en el banco crece en forma exponencial cuando se añade un interés a un tipo, digamos, del 7% de cualquier cantidad que esté en el banco cada año. Las poblaciones crecen en forma exponencial cuando se multiplican por una fracción de sí mismas cada año, o cada mes, o, en el caso de los microbios, cada pocos minutos. Cuando algo crece en forma exponencial, se duplica en forma continua —2, 4, 8, 16, 32— con un tiempo de duplicación característico.

equilibrio: Cuando los flujos de salida y de entrada de un *stock* son iguales (ver *stock*). Una población está en equilibrio cuando sus nacimientos e inmigraciones están en equilibrio con sus defunciones y emigraciones. Un lago está en equilibrio cuando el agua que recibe es igual a la que cede más su evaporación. En el estado de equilibrio los contenidos de un *stock* cambian continuamente, pero su nivel promedio permanece constante.

erosión: Una declinación en la base de recursos que soporta a un sistema que en sí mismo puede conducir a una mayor caída. Un bucle de retroalimentación positiva que va hacia abajo, de forma tal que cada reducción hace más probable la siguiente.

estructura: El conjunto de *stocks*, flujos, bucles de retroalimentación y retrasos que definen todas las interconexiones de un sistema. La

estructura de un sistema determina la escala completa de posibilidades de comportamiento. El comportamiento efectivo en cada momento dado surge de la estructura del sistema, más su medio ambiente y su estado interno en ese momento.

flujo: La tasa de variación de un *stock*, habitualmente un flujo físico hacia o desde un *stock*. Cualesquiera que sean las unidades en que se mida un *stock*, todos los flujos hacia o desde ese *stock* son medidos en las mismas unidades por unidad de tiempo. Los flujos importantes en el World3 son la natalidad humana anual, mortandad anual, inversión de capital por año y depreciación por año, contaminación generada por año y absorbida por año, y recursos no renovables consumidos por año.

fuente: Un punto de origen de flujos materiales o energéticos usado por un sistema. Los depósitos subterráneos de carbón son las fuentes de carbón a corto plazo; a muy largo plazo, la fuente de carbón son los bosques. Los bosques son fuentes de madera a corto plazo; a plazo medio, los nutrientes del suelo, el agua y la energía solar son las fuentes de los bosques.

insumos globales*: El flujo de energía y/o material desde la fuente original, a través de un sistema (donde puede ser transformado), y su salida final hacia los sumideros últimos.

no lineal: La relación entre una causa y un efecto que no es lineal, lo que equivale a decir, no estrictamente proporcional para todos los valores de la causa o el efecto. Por ejemplo, suponga que pone dos kilogramos de fertilizante en su jardín y su rendimiento crece en un 10%, y luego añadiera otros 4 kilogramos de fertilizante y el rendimiento creciera un 20%. Hasta aquí, la relación fertilizante/rendimiento es lineal. Pero es bastante improbable que si se utilizan 200 kilogramos de fertilizante se eleve el rendimiento en un 1.000% (podría aniquilar completamente su jardín). A ese nivel, la relación no es lineal.

---

* La palabra *throughputs*, literalmente "lo que se pone y pasa a través de", se ha traducido por "insumos globales", manteniendo el supuesto que los *throughputs* son insumos tomados desde la fuente que pasan a través de procesos en los que pueden ser transformados hasta que alcanzan los sumideros planetarios.*(N. del T.)*

retraso: El lapso de tiempo entre una causa y un efecto. Puede ser resultado de la intervención de procesos físicos que requieren tiempo. Por ejemplo, hay un retraso de construcción entre la inversión inicial en una planta generadora de electricidad y su finalización, y un retraso entre la aplicación de un pesticida al suelo y su eventual filtración a los acuíferos subterráneos. También puede haber retrasos en los flujos de información —por ejemplo, el "ruido" normal o variación en el clima significa que el comportamiento del clima debe promediarse a lo largo de varios años antes de que se disponga de información fiable acerca de un posible cambio climatológico.

sistema: Un conjunto de elementos interconectado que está organizado de forma coherente en torno a un mismo objetivo. Un sistema es más que la suma de sus partes. Puede exhibir comportamientos dinámicos, adaptativos, de persecución de objetivos, de autopreservación.

sobrepasamiento*:Pasarse de un objetivo, ir más allá de él, y, en el significado específico de este libro, ir más allá de la capacidad sostenible de transporte del medio ambiente. El *sobrepasamiento* está causado por retrasos o fallos en los procesos de retroalimentación informativa que impiden a un sistema que se controle a sí mismo con relación a sus límites. El *sobrepasamiento* es también una función de la velocidad de cambio o movimiento del sistema —un retraso en la retroalimentación que puede ser acomodado a baja velocidad puede ocasionar un *sobrepasamiento* a mayor velocidad.

stock: Una acumulación, almacenamiento, nivel o cantidad de material, energía o información. Representa el estado actual de un sistema; refleja la historia de los flujos hacia y desde ese *stock*; y, ya que los *stocks* sólo cambian con lentitud a lo largo del tiempo, puede actuar como un retraso en la respuesta del sistema. *Stocks* importantes en el modelo World3 son la población, el capital industrial, el capital de servicios, la tierra destinada a uso agrícola, la contaminación y los recursos no renovables.

sumidero*: El destino último de los flujos materiales y de energía usados por un sistema. La atmósfera es el sumidero para el dióxido de carbono generado por la combustión del carbón. Un vaciadero municipal suele ser a menudo el sumidero de papel hecho de pulpa de madera procedente de un bosque.

*El término original inglés *overshoot* carece de traducción precisa, es un término aplicado en economía a fenómenos de *sobrepasamiento* de barreras preestablecidas, como topes de tipos de cambio. Se ha optado por la no muy castiza palabra "*sobrepasamiento*", de sobrepasar o rebasar un límite. El uso de "*sobrepasamiento*" se ha extendido entre los economistas dedicados a los modelos informáticos y matemáticos. *(N. del T.)*

* Cuando se observa con detenimiento las fuentes y los sumideros, y especialmente cuando se observan a largo plazo, se puede ver que no se trata de cosas, como los cubos que pueden llenarse o vaciarse, sino de procesos. Son cubos que son constantemente rellenados o vaciados por la naturaleza a velocidades variables. Las fuentes y los sumideros son límites para los sistemas, pero son —en última instancia— límites a la tasa de variación en que pueden ocurrir las cosas, y no en la cantidad en que pueden ocurrir.

ÍNDICE DE CUADROS E ILUSTRACIONES CON FUENTES

Capítulo 1

Cuadro 1-1 35

CRECIMIENTO MUNDIAL DE ACTIVIDADES HUMANAS SELECCIONADAS Y PRODUCTOS 1970-1990

Asociación de Fabricantes de Vehículos de Motor de Estados Unidos, *World Motor Vehicle Data 1990* (Washington, DC); Asociación de Fabricantes de Vehículos de Motor de Estados Unidos, *World Motor Vehicle Data 1976* (Washington, DC); Administración de la Información de Energía, Departamento de Energía de Estados Unidos, *Annual Energy Review 1989* (Washington, DC; Government Printing Office); Administración de la Información de Energía, Departamento de Energía de Estados Unidos, *Monthly Energy Review* (Washington DC; Government Printing Office, mayo de 1991); Oil & Gas Journal, *Energy Statistic Sourcebook 1990* (Tulsa, OK: Penn Well Publishing Co., 1991); Oficina del Censo de Estados Unidos, *Statistical Abstracts of the United States 1990* (Washington, DC; Government Printing Office); Instituto Americano del Hierro y el Acero, *Annual Statistical Report 1990* (Nueva York); Oficina de Minería de Estados Unidos, *Mineral Commodities Summaries 1990* (Washington, DC; Government Printing Office); Oficina de

Minería de Estados Unidos, *Mineral Facts & Problems 1970* (Washington, DC; Government Printing Office); *Yearbook of World Energy Statistics 1979* (Nueva York; Naciones Unidas, 1981); *Yearbook of World Energy Statistics 1988* (Nueva York; Naciones Unidas); *Energy Statistics Yearbook 1989* (Nueva York; Naciones Unidas, 1991); *Statistical Yearbook 1975* (Nueva York; Naciones Unidas); OCDE, *The State of the Environment 1991* (París); John E. Tilton, ed., *World Metal Demand* (Washington, DC; Resources for the Future, 1990), 231-232.

Ilustración 1-1 32
POBLACIÓN MUNDIAL
The Future Growth of World Population, Population Studies núm. 28 (Nueva York; Naciones Unidas, 1958); Donald J. Bogue, *Principles of Demography* (Nueva York; John Willey & Sons, 1969).

Ilustración 1-2 33
PRODUCCIÓN INDUSTRIAL MUNDIAL
Statistical Yearbook 1948 y años subsiguientes (Nueva York; Naciones Unidas); *Demographic Yearbook 1989* (Nueva York); Population Reference Bureau, *1990 World Population Data Sheet* (Washington D.C, 1990); *Industrial Statistics Yearbook 1988* (Nueva York; Naciones Unidas); *Monthly Bulletin of Statistics* (Nueva York; Naciones Unidas, agosto de 1991).

Ilustración 1-3 34
CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA
Lester Machta, "The Role of the Oceans and Biosphere in the Carbon Dioxide Cycle", en David Dyrssen y Daniel Jagner, editores, *The Changing Chemistry of the Oceans*, Actas del 20° Simposio Nobel (Göteborg, Suecia, agosto de 1971); T. A. Boden, R. J. Sepanski, y F. W. Stoss, *Trends'91: A Compendium of Data on Global Change* (Oak Ridge, TN; Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1991).

Ilustración 1-4 38
PROYECCIONES ALTERNATIVAS PARA LA POBLACIÓN GLOBAL Y BIENES DE CONSUMO *PER CÁPITA* HASTA EL 2100

Capítulo 2

Cuadro 2-1 48
PERIODOS DE DUPLICACIÓN

Cuadro 2-2 48
POBLACIÓN DE NIGERIA CON UN CRECIMIENTO EXPONENCIAL CONTINUADO

Cuadro 2-3 53
ADICIONES A LA POBLACIÓN MUNDIAL, 1971 Y 1991

Ilustración 2-1 44
CONSUMO MUNDIAL DE FERTILIZANTES
Statistical Yearbook 1951 y años subsiguientes (Nueva York; Naciones Unidas); FAO, *Fertilizer Yearbook 1989* (Nueva York; Naciones Unidas); FAO, *The State of Food and Agriculture 1991*, Actas de la 26ª Sesión de la FAO (Roma; Naciones Unidas, noviembre de 1991), 9-28.

Ilustración 2-2 45
POBLACIÓN URBANA MUNDIAL
World Population Prospects 1990 (Nueva York; Naciones Unidas); Population Reference Bureau, *1991 World Population Data Sheet* (Washington, DC, 1991).

Ilustración 2-3 46
CRECIMIENTO LINEAL DEL AHORRO COMPARADO CON SU CRECIMIENTO EXPONENCIAL

Ilustración 2-4 54
TRANSICIÓN DEMOGRÁFICA MUNDIAL
The World Population Situation 1970, Population Studies núm. 49 (Nueva York; Naciones Unidas, 1971); *World Population Prospects 1990* (Nueva York; Naciones Unidas).

Ilustración 2-5 55
INCREMENTO ANUAL MUNDIAL DE LA POBLACIÓN
The Determinants and Consequences of Population Trends, Population Studies núm. 50 (Nueva York; Naciones Unidas, 1973); *World Population*

Prospects 1990 (Nueva York; Naciones Unidas); Edward Bos *et al., Asia Region Population Projections, 1990-1991*, Working Papers series 599 (Population, Health, and Nutrition Division, Population and Human Resources Dept. of Policy, Research, and External Affairs, The World Bank, febrero de 1991).

Ilustración 2-6a..... 59
TRANSICIONES DEMOGRÁFICAS EN NACIONES INDUSTRIALIZADAS

Ilustración 2-6b..... 60
TRANSICIONES DEMOGRÁFICAS EN NACIONES MENOS INDUSTRIALIZADAS

Demographic Yearbook 1950 y años subsiguientes (Nueva York; Naciones Unidas); R.A. Easterlin, editor, *Population and Economic Changes in Developing Countries* (Chicago; University of Chicago Press, 1980); J. Chesnais, *La Transition Demographique* (París; Presses de la Université de France, 1986); Nathan Keyfitz y W. Flieger, *World Population: An Analysis of Vital Data* (Chicago; University of Chicago Press, 1968); Population Reference Bureau, *1991 World Population Data Sheet* (Washington DC, 1991); U.K. Office of Population Censuses & Surveys, *Population Trends*, núm. 52 (London; H.M.S.O., junio de 1988).

Ilustración 2-7..... 61
TASAS DE NATALIDAD Y PIB *PER CÁPITA* EN 1989

Population Reference Bureau, *1991 World Population Data Sheet* (Washington, DC, 1991); Population Reference Bureau, *1989 World Population Data Sheet* (Washington, DC, 1989); CIA, *Handbook of Economic Statistics 1990* (Washington DC, septiembre de 1990).

Ilustración 2-8..... 63
FLUJOS DE CAPITAL EN EL MODELO ECONÓMICO WORLD3

Ilustración 2-9..... 65
PIB DE EE UU POR SECTORES

U.S. Bureau of the Census, *Historical Statistics of the United States; colonial times to 1970, bicentennial edition, pt.1* (Washington DC; Government Printing Office, 1975); U.S. Council of Economic Advisors, *Economic*

Report of the President, transmitido al Congreso, febrero de 1991, junto con el Annual Report of the Council of Economic Advisors (Washington DC; Government Printing Office, 1991).

Ilustración 2-10..... 67
CRECIMIENTO DEL PIB PER CÁPITA EN PAÍSES SELECCIONADOS

CIA, *Handbook of Economic Statistics 1990* (septiembre de 1990); Banco Mundial, *World Tables*, 3ª ed. (Baltimore; Johns Hopkins University Press, 1983); Banco Mundial, *World Tables* 1991 (Baltimore; Johns Hopkins University Press, 1991).

Ilustración 2-11..... 71
PRODUCCIÓN REGIONAL DE ALIMENTOS

FAO, *The State of Food and Agriculture 1955* y años subsiguientes (Roma; Naciones Unidas).

Capítulo 3

Cuadro 3-1..... 101

PRODUCCIÓN ANUAL Y RELACIONES PRODUCCIÓN/RESERVAS PARA PETRÓLEO, CARBÓN Y GAS, 1970 Y 1989

Las cifras para 1970 son de la Oficina de Minas de Estados Unidos, *Mineral Facts and Problems* (Washington, DC; Government Printing Office, 1970). Las cifras para 1990 son de la World Energy Conference, *Survey of Energy Resources* (1989).

Cuadro 3-2..... 104
RESERVAS MUNDIALES Y PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO, EN REGIONES Y NACIONES SELECCIONADAS

C. D. Master, D. H. Root, y E. D. Attanasi, "Resource Constraints in Petroleum Production Potential", *Science*, 253 (12 de julio de 1991): 147.

Cuadro 3-3..... 118
MINERALES DE IMPORTANCIA ECONÓMICA: RELACIONES DE TENOR EXPLOTABLE CON LA ABUNDANCIA CORTICAL MEDIA

Earl Cook, "Límites a la explotación de recursos no renovables" en Philip H. Abelson y Allen L. Hammond, editores, *Materials: Renewable and Nonrenewable Resources* (Washington, DC; American Association for the Advancement of Science, 1976), 63.

Cuadro 3-4..... 135
EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA POBLACIÓN, AFLUENCIA Y TECNOLOGÍA
Amory Lovins, Rocky Mountain Institute, Snowmass, CO, 1990.

Ilustración 3-1..... 76
POBLACIÓN Y CAPITAL EN EL ECOSISTEMA GLOBAL
R. Goodland, H. Daly, y S. El Serafy, "Environmentally Sustainable Economic Development Building on Bruntland", *Environment* Working Paper núm. 46 (The World Bank; julio de 1991).

Ilustración 3-2..... 79
PRODUCCIÓN MUNDIAL DE GRANO 1950-1990
FAO, *Production Yearbook 1951* y años subsiguientes (Roma; Naciones Unidas); FAO, Boletín Estadístico Trimestral 4, núm. 2 (Roma; Naciones Unidas, 1991).

Ilustración 3-3..... 80
RENDIMIENTO DE GRANOS
FAO, *Production Yearbook 1970* y años subsiguientes (Roma; Naciones Unidas).

Ilustración 3-4..... 82
POSIBLES FUTUROS DEL SUELO
Estimaciones sobre la tierra de: G. M. Higgins *et al., Potential Population Supporting Capacities of Lands in the Developing World* (Roma; FAO, 1982); World Resources Institute, *World Resources 1990-91* (Nueva York; Oxford University Press, 1990); Estimaciones de población de: Rodolfo A. Bulatao *et al., World Population Projections 1989-90*, Banco Mundial (Baltimore; Johns Hopkins University Press, 1990).

Ilustración 3-5..... 87
RECURSOS DE AGUA DULCE
Robert P. Ambroggi, "Water", *Scientific American* (septiembre de 1980): 103.

Ilustración 3-6..... 91
SUPERFICIE FORESTAL EN COSTA RICA 1940-1984
Carlos Quesada, editor, Estrategia de conservación para el desarrollo sostenible en Costa Rica, ECODES (San José; Ministerio de Recursos naturales, Energía y Minas).

Ilustración 3-7..... 93
POSIBLES CAMINOS DE LA DEFORESTACIÓN TROPICAL

Ilustración 3-8..... 94
PRODUCCIÓN MUNDIAL DE MADERA EN TRONCOS
FAO, *Forest Production Yearbook 1960* y años subsiguientes (Roma; Naciones Unidas); FAO, *The State of Food and Agriculture 1991*, Actas de la 26ª Sesión (Roma; Naciones Unidas, noviembre de 1991), 9-28.

Ilustración 3-9..... 100
UTILIZACIÓN MUNDIAL DE LA ENERGÍA
Energy Statistics Yearbook 1982 y años subsiguientes (Nueva York; Naciones Unidas); Ged R. Davis, "Energy for Planet Earth", *Scientific American* (septiembre de 1990): 55-62.

Ilustración 3-10..... 105
HISTORIA DE LA PRODUCCIÓN Y EXPLORACIÓN PETROLERA DE ESTADOS UNIDOS
Instituto Americano del Petróleo, *Basic Petroleum Data Book* (Washington DC, mayo de 1991); Cuteler J. Cleveland y Robert K. Kaufmann, "Forecasting Ultimate Oil Recovery and its rate of Production: Incorporating Economic Forces into the Models of M. King Hubbert", *The Energy Journal* 12, núm. 2 (1991): 17-43.

Ilustración 3-11..... 106
AGOTAMIENTO DE LAS RESERVAS MUNDIALES DE GAS SUPONIENDO DIFERENTES TASAS DE CRECIMIENTO EN EL CONSUMO

Ilustración 3-12..... 107
DESCUBRIMIENTOS NECESARIOS DE GAS PARA MANTENER UNA TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL 3,5%

Adaptado de: A. A. Bartlett, "Forgotten Fundamentals of the Energy Crisis", *American Journal of Physics* 46 (1978): 880.

Ilustración 3-13 110
COSTES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ORIGEN SOLAR Y EÓLICO
G.Heaton et al., *Transforming Technology: An Agenda for Environmentally Sustainable Growth in the 21st Century* (Washington, DC; World Resources Institute, abril de 1991).

Ilustración 3-14 114
TENDENCIAS EN EL CONSUMO ESTADOUNIDENSE DE MATERIALES
Eric D. Larson, Marc H. Ross, y Robert H. Williams, "Beyond the Era of Materials", *Scientific American* (junio de 1986); U.S. Bureau of the Census, *Statistical Abstracts of the United States*, 110ª edición (Washington DC; Government Printing Office, 1990); U.N. Economic Comission for Europe, *Annual Review of the Chemical Industry 1988* (Nueva York; 1990).

Ilustración 3-15 115
CONSUMO MUNDIAL DE METALES
Eugene N. Cameron, *At the Crossroads: The Mineral Problems of the United States* (Nueva York; John Wiley & Sons, 1986); Oficina de Minas de Estados Unidos, *Minerals Yearbook 1989* (Washington, DC; Government Printing Office).

Ilustración 3-16 119
CALIDAD DECRECIENTE DEL MINERAL DE COBRE EXTRAÍDO EN ESTADOS UNIDOS, 1906-1990
Oficina de Minas de Estados Unidos, *Minerals Yearbook 1906* y años subsiguientes (Washington DC; Government Printing Office).

Ilustración 3-17 120
EL AGOTAMIENTO DE LOS TENORES DE MINERAL INCREMENTA SENSIBLEMENTE LOS RESIDUOS MINEROS GENERADOS EN SU PRODUCCIÓN

Ilustración 3-18 122
CONTAMINACIÓN HUMANA DECRECIENTE POR DDT, DIELDRIN Y PLOMO EN TRES PAÍSES
UNEP, *Environmental Data Report 1989/90* y años subsiguientes (Oxford; Basil Blackwell, Ltd.); G. Ducoffre, F. Claeys, y P. Bruaux, "Lowering Time Trend of Blood Lead Levels in Belgium Since 1978", *Environmental Research* 51 (1990): 25-34.

Ilustración 3-19 123
TENDENCIAS EN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE SELECCIONADOS
OCDE, *The State of the Environment 1991* (París).

Ilustración 3-20 124
CONTAMINACIÓN DEL RÍO RIN
Karl-Geert Mall, "Der Rhein-Modell für den Gewässerschutz", *Spektrum der Wissenschaft* (agosto de 1983): 22; World Resources Institute, *World resources 1990-1991* (Nueva York; Oxford University Press, 1990); I. F. Langeweg, *Concerns for Tomorrow* (Bilthoven, Holanda; Rikinstituut voor Volksgesondheit en Milieuhygiene (RIVM), 1989).

Ilustración 3-21 127
CONCENTRACIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
Organización Meteorológica Mundial/UNEP, *Climate Change: The IPCC Scientific Assesment*, Executive Summary (1990).

Ilustración 3-22 128
INCREMENTO GLOBAL DE LA TEMPERATURA
T. A. Boden, R. J. Sepanski, y F. W. Stoss, *Trends'91: A compendium of Data on Global Change* (Oak Ridge, TN; Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1991).

Ilustración 3-23 131
GASES DE INVERNADERO Y TEMPERATURA GLOBAL DURANTE LOS ÚLTIMOS 160.000 AÑOS
R. A. Houghton y G. M. Woodwell, "Global Climate Change", *Scientific American* (abril de 1989): 40.

Capítulo 4

Ilustración 4-1 142

NUTRICIÓN Y EXPECTATIVAS DE VIDA

FAO, *Production Yearbook 1989* (Roma; Naciones Unidas, 1990); Population Reference Bureau, *1988 World Population Data Sheet* (Washington, DC, 1988).

Ilustración 4-2 143

POSIBLES MODALIDADES DE APROXIMACIÓN DE UNA POBLACIÓN A SU CAPACIDAD DE SUSTENTACIÓN

Ilustración 4-3 146

BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN QUE GOBIERNAN EL CRECIMIENTO DE POBLACIÓN Y CAPITAL

Ilustración 4-4 148

BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN DE POBLACIÓN, CAPITAL, AGRICULTURA Y CONTAMINACIÓN

Ilustración 4-5 149

BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN DE POBLACIÓN, CAPITAL, SERVICIOS Y RECURSOS

Ilustración 4-6 151

ENERGÍA REQUERIDA PARA PRODUCIR METAL PURO DEL MINERAL

N. J. Page y S. C. Creasey, "Ore Grade, Metal Production, and Energy", *Journal of Research*, U.S. Geological Survey 3, núm. 1 (enero/febrero de 1975): 9-13.

Ilustración 4-7 157

INFINIDAD DENTRO, INFINIDAD FUERA

Ilustración 4-8 159

CAUSAS ESTRUCTURALES DE LOS CUATRO MODOS POSIBLES DE COMPORTAMIENTO DEL MODELO MUNDIAL

Ilustración 4-9 161

LA LENTA FILTRACIÓN DEL 1,2-DCP EN LOS ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS

N. L. van der Noot, NV Waterleidingmaatschappij "Drenthe", Geohydrologisch modelonderzoek ten behoeven van het nitraat-en 1,2-DCP onderzoek in de omgeving van het pompstation Noordbargerers, 1991; R. van de Berg (RIVM), comunicación privada.

Escenario 1 168

EL "ENSAYO ESTÁNDAR" DE *LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO*

Escenario 2

SE DUPLICAN LOS RECURSOS DEL ESCENARIO 1

Capítulo 5

Cuadro 5-1 181

USOS, TASAS DE PRODUCCIÓN Y TIEMPOS DE PERMANENCIA DE LOS PRINCIPALES AGENTES QUÍMICOS DAÑINOS PARA EL OZONO

A. Makhijani, A. Makhijani y A. Bickel, *Saving Our Skins: Technical Potential and Policies for the Elimination of Ozone-depleting Chlorine Compounds* (Environmental Policy Institute and the Institute for Energy and Environmental Research, septiembre de 1988); Environmental Studies Board of the National Research Council, *Causes and Effects of Changes in Stratospheric Ozone: 1983 Update* (Washington, DC; National Academy Press, 1984).

Ilustración 5-1 182

PRODUCCIÓN MUNDIAL REGISTRADA DE CFC-011 Y CFC-012

Chemical Manufacturers Association, *1989 Production and Sales of Chlorofluorocarbons 11 & 12* (CMA Fluorocarbon Program Panel, diciembre de 1990); Mack McFarland, "Chlorofluorocarbons and Ozone:1st Plenary Jekyll Is. Meeting", *Environmental Science and Technology* 23, núm. 10 (1989).

Ilustración 5-2 184
ABSORCIÓN DE LA LUZ ULTRAVIOLETA POR LA ATMÓSFERA
UNEP, *La capa de ozono*, UNEP/GEMS Library núm. 2 (Nairobi, 1987).

Ilustración 5-3 187
CÓMO LOS CFC DESTRUYEN EL OZONO ESTRATOSFÉRICO

Ilustración 5-4 189
MEDICIÓN DEL OZONO EN BAHÍA HALLEY, ANTÁRTIDA
J. C. Farman, B. G. Gardiner y J. D. Shanklin, "Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO_x/NO_x Interaction", *Nature*, 314 (1985): 207-210.

Ilustración 5-5 190
A MEDIDA QUE AUMENTA EL CLORO REACTIVO, DECRECE EL OZONO ANTÁRTICO
J. G. Anderson, W. H. Brune, y M. H. Proffitt, "Ozone Destruction by Chlorine Radicals within the Antarctic Vortex: The Spatial and Temporal Evolution of $ClO-O_3$ Anticorrelation Based on in Situ ER-2 Data", *Journal of Geophysical Research*, 94, núm. D9 (30 de agosto de 1989): 11, 465- 11, 479.

Ilustración 5-6 194
CRECIMIENTO REAL Y PROYECTADO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CLORO ESTRATOSFÉRICO INORGÁNICO POR LAS EMISIONES DE CFC
John S. Hoffman y Michael J. Gibbs, *Future Concentrations of Stratospheric Chlorine and Bromine*, Office of Aire and Radiation, US Environmental Protection Agency 400/1-88/005 (Washington, DC; Government Printing Office, agosto de 1988); R. E. Benedick, *Ozone Diplomacy: New Directions in Safeguarding the Planet* (Cambridge; Harvard University Press, 1991).

Capítulo 6

Escenario 3 206
DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN

Escenario 4 208
DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN E INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE LA TIERRA

Escenario 5 210
DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN, INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE LA TIERRA Y PROTECCIÓN DE LA EROSIÓN DEL SUELO

Escenario 6 212
DUPLICACIÓN DE RECURSOS Y TECNOLOGÍA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN, INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE LA TIERRA, PROTECCIÓN DE LA EROSION DEL SUELO Y TECNOLOGÍA EFICIENTE EN RECURSOS

Escenario 7 214
APLICACIÓN DE TODAS LAS TECNOLOGÍAS CON MENOR RETRASO

Ilustración 6-1 220
COSTES NO LINEALES DE ELIMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN
J. Alcamo, R. Shaw, y L. Hordijk, "The RAINS Model of Acidification", *Science and Strategies in Europe* (Dordrecht, Holanda; Kluwer Academic Publishers, 1990).

Ilustración 6-2 221
UTILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA OPEP Y PRECIOS MUNDIALES DEL PETRÓLEO
Energy Information Administration, US Department of Energy, *Annual Energy Review 1990* (Washington, DC; Government Printing Office, mayo de 1991); Oil & Gas Journal, *Energy Statistics Sourcebook*, 6ª edición (Tulsa, OK; PennWell Publishing Co., 1991).

Ilustración 6-3 226
LA POBLACIÓN DE ATÚN DE ALETA AZUL DECLINA MIENTRAS SE INCREMENTAN LOS ESFUERZOS PESQUEROS

Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT), Standing Committee for Research and Statistics of ICCAT, informe 1991.

Capítulo 7

Escenario 8..... 234
EL MUNDO ADOPTA OBJETIVOS ESTABLES DE POBLACIÓN EN 1995

Escenario 9..... 236
EL MUNDO ADOPTA OBJETIVOS ESTABLES DE POBLACIÓN Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL EN 1995

Escenario 10..... 238
POBLACIÓN E INDUSTRIA ESTABILIZADAS CON TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES, LA EROSIÓN Y EL USO DE RECURSOS ADOPTADAS EN 1995

Escenario 11..... 242
POBLACIÓN E INDUSTRIA ESTABILIZADAS CON TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES, LA EROSIÓN Y EL USO DE RECURSOS ADOPTADAS EN 1975

Escenario 12..... 244
POBLACIÓN E INDUSTRIA ESTABILIZADAS CON TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES, LA EROSIÓN Y EL USO DE RECURSOS ADOPTADAS EN EL 2015

Escenario 13..... 246
POLÍTICAS DE EQUILIBRIO PERO CON OBJETIVOS MÁS ALTOS DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y DE ALIMENTOS

Capítulo 8

Ilustración 8-1..... 277
HORIZONTE TEMPORAL DEL MODELO WORLD3

APÉNDICE

Cuadro A-1..... 293
ESCALAS VARIABLES EN LOS ESCENARIOS DEL WORLD3/91

Ilustración A-1..... 280
CONTAMINACIÓN PERSISTENTE

Ilustración A-2..... 280
RECURSOS NO RENOVABLES

Ilustración A-3a..... 282
SECTOR DE POBLACIÓN

Ilustración A-3b..... 283
SECTOR DE POBLACIÓN

Ilustración A-4a..... 284
PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Ilustración A-4b..... 285
PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Ilustración A-5..... 286
FERTILIDAD DE LA TIERRA

Ilustración A-6..... 286
DESARROLLO Y PÉRDIDA DE TIERRA

Ilustración A-7..... 287
PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

Ilustración A-8..... 288
PRODUCCIÓN DE SERVICIOS

Ilustración A-9..... 288
EMPLEOS

Ilustración A-10 289
GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE INSUMOS AGRÍCOLAS Y RENDIMIENTO DE LA TIERRA

Ilustración A-11 289
GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE SALUD HUMANA Y FERTILIDAD

Ilustración A-12 290
GRÁFICO REVISADO DE RELACIÓN ENTRE CONSUMO DE ALIMENTOS Y LONGEVIDAD

Ilustración A-13 290
GRÁFICO REVISADO DE RELACIÓN ENTRE SERVICIOS SANITARIOS Y EXPECTATIVAS DE VIDA

Ilustración A-14 291
GRÁFICO REVISADO DE LA RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y UTILIZACIÓN *PER CÁPITA* DE RECURSOS NO RENOVABLES

Ilustración A-15 292
LA FORMULACIÓN DE STELLA UTILIZADA PARA REPRESENTAR LA TECNOLOGÍA ADAPTATIVA QUE AFECTA AL RENDIMIENTO DE LA TIERRA EN EL WORLD3/91

ÍNDICE ALFABÉTICO

A

Academia Nacional de Ciencias, 187
Acuerdo de Londres sobre el uso de los CFCs, 195, 198
Aeroscientific, 130
afluencia, 134, 136
África, 56, 68, 80, 84, 94, 144, 217, 260, 269
agua,36, 46, 50, 62, 74, 76, 84, 86, 88, 90, 95, 103, 108, 110, 112, 121, 122, 124, 130, 132, 136, 139, 140, 158, 163, 164, 184, 225, 238, 261
  contaminación, 84, 103, 121, 122, 125, 132, 158, 160, 165, 166, 173, 186
  demanda y oferta mundial, 86, 88
  subterránea, 50, 84, 89, 103, 125, 132, 145, 160, 162, 166, 254
agujero de ozono 188-192
Alaska, 89, 108
alimentos *per cápita,* 216, 232, 236
  contra expectativas de vida, 141, 242
  en las regiones del mundo, 71, 72
Alsacia, 121
aluminio, 111, 113, 150
  uso mundial de, 35
América del Norte, 68, 84, 187
América Latina, 81, 84, 191
amor, 256, 260, 265, 274, 276
Antártida, 188, 190, 191, 192
aprendizaje, 51, 265, 269, 272-274
Arabia Saudí, 88
arrecifes de coral, 90, 91
Asia, 81, 84, 180, 197
Atlántico noroccidental, 224
atún, aleta azul, 224, 225

automóviles, 108, 113, 251
cantidad en el mundo, 35
composición de materiales, 116
eficiencia, 108
propiedad de, 111
avión de investigación ER-2, 190

B

Bahía Halley, Antártida, 188, 190
Banco Georges, 224
Banco Mundial, 68, 77, 83, 95
Informe sobre el Desarrollo, 68
previsiones forestales, 93
proyecciones de población, 55, 82
Bangkok, 89
Bangladesh, 67
basura, *ver* residuos sólidos, 116
bebidas sin alcohol
consumo, 35
envases, en EE UU, 35
Bélgica, 120, 122
biodiversidad, *ver* especies, 117, 166
biotecnología, 117
BMW, 115
bosques, 77, 78, 85, 89, 96, 98, 130, 132, 133, 254
ciclos en, 162, 163
contaminación de, 95
función ecológica, 95
gestión sostenible, 89
motivos de deforestación, 92
bosques tropicales, 92, 95, 96, 97
diversidad de especies en, 95, 97
tasa de deforestación, 92
tasas potenciales de destrucción, 93
Brasil, 57, 90, 92, 111, 233
British Antarctic Survey, 188
bucle de retroalimentación, 27, 70, 66, 221, 321, 322
bucles de retroalimentación negativos, 50, 54
definición de, 321
en World3, 203
bucles de retroalimentación positivos, 51, 70, 129
de crecimiento de la población, 54
de población y pobreza, 69
de inversión, 64
definición de, 50, 321
en cambios climatológicos, 128, 129
en la erosión, 164-166
en World3, 146, 148, 149, 208
Butte, Montana, 118

C

California, 88, 121, 210
Canadá, 84, 89
capa de ozono, 168, 218
deterioro de, 37, 125, 130, 133, 145, 156, 179, 185,-192
formación de, 182
capacidad de sustentación, 143, 144
erosión, 163
modos de aproximación, 143, 149
capital, 38, 65, 68, 76, 78, 88, 99, 109, 110, 117, 132-134, 137, 221, 223, 227, 230, 233, 234, 236, 238, 242, 249, 251, 254
definición, 27, 62, 63
modos de comportamiento dinámicos, 65
capital de servicios, 62
definición, 27
en World3, 324
capital financiero, 226
definición, 27
capital físico, 110, 222, 255
definición, 27
capital industrial, 51, 52, 62, 64, 66, 69, 75
definición, 27, 51, 62
en World3, 75, 291, 324
capital para la obtención de recursos, 62
definición, 62, 233
carbón, 51, 100, 101, 104, 108, 109, 111, 222, 261
consumo mundial de, 35, 100
reservas, 101
Catton, William R., Jr., 139
cayos de Florida, 224
Ciudad de México, 89
clima, 125, 126, 163, 165, 166, 185, 196, 261
certidumbres científicas, 126
definición de, 126
incertidumbres científicas, 127, 128
registro a largo plazo, 324
temperatura global, 126
clorofluorocarbonos (CFC), 130, 133, 145, 191, 194, 223
características de, 186
efectos en la capa de ozono, 125, 133, 186, 188, 192, 195
en aerosoles, 186, 188
fórmulas químicas de, 180-181
producción mundial de, 188, 193
substitutos para, 192, 195, 196
tiempo de permanencia en la atmósfera, 181
Club de Roma, 250
cobre, 111, 113, 116, 150, 174
tenor del mineral en EE UU, 118
colapso, 36, 40, 145, 200, 206, 214, 219, 227, 228, 230, 238, 246, 248, 255, 259, 263, 274, 276, 278
definición de, 322
evitarlo, 176, 177
sobrepasamiento y, 164-167, 172-174, 176, 198, 201, 212, 224, 231
combustibles fósiles, 28, 36, 99, 100, 101, 107, 110, 117, 118, 126, 132
reservas, 101, 102, 104, 106
stocks del sistema y flujos, 102, 103, 112
Comisión de las Pesquerías del Báltico, 227
Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 41, 75, 133, 248
Conferencia de Estocolmo sobre el Medio Ambiente, 119
Conferencia Mundial de la Energía, 99
Consejo General de las Pesquerías del Mediterráneo, 224
construcción de redes, 268, 269
consumo, 28, 33, 38, 40, 43, 62, 69, 79, 96, 99, 100, 103, 104, 108, 113, 114, 118, 130, 132, 137, 150, 155, 158, 168, 175, 199, 202, 212, 214, 216, 232, 233, 264
contaminación, 26, 32, 36, 38, 43, 51, 52, 55, 75, 88, 95, 97, 98, 103, 104, 108, 113, 116, 120, 129, 130, 136, 140, 141, 145,

162, 163, 166, 167, 200, 203, 227, 229, 267
agua, 84, 103, 121, 122, 125, 132
aire, 77, 95, 122, 133
contaminación de los mecanismos de absorción, 165
costes de eliminación, 122
de la población y de la población industrial, 30, 36, 51, 52, 55, 75, 76, 132
de los combustibles fósiles, 101,102, 103
dieldrin, 120
dióxido de azufre, 101, 121, 122
dióxido de carbono, 32, 95, 101, 103, 121, 125, 128, 129
gases de invernadero, 125, 126, 128, 129, 130
generada por el crecimiento de la población, 51, 52
límites de absorción en World3, 152, 153, 204, 205
Cook, Earl, 117
Corea del Sur, 234
Costa Rica, 61, 90, 92
deforestación, 90
política forestal, 92
crecimiento, 28, 32, 33, 40, 45, 55, 57, 58, 62, 66-70, 73, 79, 85, 90, 92, 99, 104, 109, 114, 117, 120, 121, 122, 133, 139, 140, 141
causas estructurales del, 36
crecimiento cero, 250
crecimiento exponencial, 43, 45, 47, 49, 50-53, 57, 66, 75, 83, 85, 86, 103, 113, 151, 168, 198, 219, 227, 231, 232, 249, 255, 322
clasificaciones de, 70
definición de diccionario, 28
matemáticas del, 106, 241
razones para el, 33-35
tiempo de duplicación, 48, 78
crecimiento sigmoideo, 144, 155, 162
diagrama de sistema del, 144
papel en el *sobrepasamiento,* 162
razones para el
estructurales, 35
institucionales, 33
psicológicas, 34
Chernóbil, 217
China, 58, 61, 84, 89, 94, 99, 180, 195

D

Dakar, 89
Daly, Herman, 77
DDT, 120, 122, 145, 158
depreciación, 65, 140, 146, 165, 170, 173, 175, 206, 234, 254
desalinización, 86, 89
desarrollo, 27, 31, 41, 68, 81, 83, 85, 144, 152, 170, 196, 203, 204, 208, 214, 219, 222, 223, 226, 250, 255- 257, 263, 264, 265, 266, 271, 273, 274
definición de diccionario de, 28
desempleo, 40, 227, 251, 255
desertización, 81, 84, 98, 164, 166
diagrama de sistemas
de crecimiento de capital, 64
de crecimiento exponencial de la población, 49
de insumos globales, 36
de *stocks* y flujos de combustibles, 101, 102
de *stocks* y flujos materiales, 112
de World3, 146, 148, 149
del crecimiento de la población, 53
dicloropropano (DCPa), 160
dicloropropene (DCPe), 160
dieldrin, 120, 122
dióxido de azufre, 101, 121, 122, 219
dióxido de carbono, 34, 95, 101, 166, 196, 325
concentración atmosférica, 32, 129
de la combustión de combustibles fósiles, 103
emisión en las naciones del G-7, 121, 123
en el efecto invernadero, 125, 128, 129
disco compacto, 116
Du Pont, 188, 195
DYNAMO, lenguaje de ordenador, 281-285, 293, 294

E

economía de servicios, 66
Ecuador, 97
EE UU, 84, 89, 108, 109, 111, 113, 187, 189, 190
efecto invernadero, *ver* clima, 103, 123, 125, 126, 128, 129, 166, 196, 218,
eficiencia, 37, 38, 96, 117, 177, 200, 204, 230, 236, 240, 241, 246, 254, 266, 269, 271, 273, 276
Egipto, 57
Ehrlich, Paul, 226
electricidad, 29, 30, 65, 108, 222, 229
capacidad mundial de generación, 35
Emerson, Ralph Waldo, 266
energía, 26, 28, 29, 33, 36, 41, 51, 52, 62, 64, 75, 76, 78, 88, 98, 115, 117, 118, 124, 125, 128, 142, 133, 134, 139, 150, 170, 176, 177, 219, 222, 223, 261, 262, 264, 265, 267, 273, 275, 278
combustibles fósiles, 99-101, 107, 109, 112
consumo mundial, 99
eficiencia, 26, 108-110, 116, 121, 136, 221-222, 269
mercado, 221-223
renovable, 77, 108-110, 130
energía eólica, *ver* energía renovable
energía fotovoltaica, 109
energía nuclear
generación mundial, 35
residuos, 123, 124
energía solar, *ver* energía renovable, 108, 109, 125, 183, 323
equilibrio dinámico, 322
equilibrio, *ver* equilibrio dinámico
erosión, 150, 152, 164, 165, 168, 177, 187, 188, 214, 216, 231, 232, 254
definición de, 322
papel en el colapso, 174
social, 166
tierra, 84, 204, 208, 210, 212, 236, 238, 286
especies, 90, 95, 99, 126, 164, 175, 185, 224

número de, 96, 97
tasas de extinción, 96, 97
y producto primario neto, 98
Estados Unidos, 137, 193
aguas subterráneas, 89
deforestación, 89
Departamento de Energía, 109
eficiencia energética, 108
energía renovable, 109
erosión del suelo, 84
gastos por desperdicio de aguas, 121
PIB *per cápita,* 67
PIB por sector, 65, 66
producción de maíz, 80, 81
producción y exploración de petróleo, 103, 105
residuos de riesgo, 123
respuesta al agotamiento del ozono, 188, 193, 195
stocks pesqueros, 224
tasa de natalidad comparada con el PIB *per cápita,* 58
tenor de cobre en mineral, 118
uso de CFC, 180, 188, 193, 195, 196
uso de materiales, 111-113
uso y reciclado del papel, 96
estructura de sistema, 68
definición de, 322
puntos de vista de, 131
Europa, 38, 57, 84, 89, 95, 108, 109, 122, 130, 132, 160, 180, 193, 197, 217, 263,

F

Filipinas, 133
fotosíntesis, 185
Francia, 80
freón, 180
fuentes, 36, 75-78, 147, 162, 166, 175, 176, 203, 216, 220, 223, 228, 250, 253, 254
combustibles fósiles, 101, 102
fuentes de materiales y energía, 176, 222
definición, 323
Fuller, Buckminster, 270

G

G-7, 121, 123
Gales, 59
gas natural, 33
agotamiento, 104
consumo mundial, 100
reservas, 103, 104, 106
gas, *ver* gas natural, 100, 101, 104, 106, 108,
gases de efecto invernadero, 103, 125, 129, 130, 165, 166, 196
Grandes Lagos, 158

H

Haití, 133
halones, 195
hambre, 70, 81, 88, 216, 262
hierro, 76, 95, 111, 117, 150
Hodel, Donald, 193
Holanda, 98, 99, 120, 130, 158, 160
Instituto Nacional de Salud Pública y Protección al Medio Ambiente de Holanda (RIVM), 122

I

India, 84, 94, 95, 137, 180, 224
Indonesia, 57
industrialización, 57, 66, 81, 125, 217, 262
definición de, 28
información, 30, 41, 63, 99, 141, 144, 145, 147, 156, 173, 179, 187, 197, 198, 223, 228, 230, 231, 233, 248, 249, 252, 254, 265, 268, 269, 270, 273, 275, 276
como clave de la transformación, 263
y estructura de sistemas, 264
Inglaterra, 261
insumos globales, 36-38, 96, 113, 130, 132-134, 136, 176, 177, 216, 228, 248, 249, 254, 256, 269, 271, 273
definición, 323
ilustración, 75, 76
Intel, 130
Inuit, 158
inversión, 130, 132, 175, 200, 205, 208, 210, 214, 218, 222, 233, 234, 242
Irán, 80
Israel, 88

J

Japón, 57, 96, 108, 109, 120, 196

K

Keynes, John Maynard, 275

L

Laboratorio para aprendizaje interactivo, 294
lámparas fluorescentes compactas, 108
Las dinámicas del crecimiento en un mundo finito, 281, 285, 293
Lejano Oriente, 72
lenguaje de ordenadores STELLA, 281, 282, 284, 285, 291, 294
libertad de mercado, *ver* mercado, 199, 200, 202
libre comercio, 218
Lima, 89
límites, 29, 31, 40, 43, 51, 70, 76, 81, 84, 85, 88, 89, 99, 101, 103, 107, 111, 113, 117, 132, 134, 136, 163, 168, 173, 174, 176, 177, 197, 198, 199, 200, 202, 214, 216-217, 223, 225, 228-233, 238, 241, 244, 246, 248, 250, 251, 253-256, 265, 270, 272, 273, 275, 276, 278, 324
a los insumos globales, 36
capas de, 218
características de, 78
el tiempo como límite, 219
en World3, 152, 154-156, 173, 205, 227
y capacidad de hacerles frente, 218, 219
y crecimiento exponencial, 227
y mercados, 200, 227
y tecnología, 200, 205, 227
Los Ángeles, 133
Los límites del crecimiento, 41, 250, 281, 282, 285, 291, 291, 294

conclusiones de, 17
historia de, 20, 21
Lovejoy, Thomas E., 43
Lovins, Amory, 111
luz ultravioleta, 190
efecto sobre animales y plantas, 184, 185
efecto sobre la salud humana, 183
lluvia ácida, 7, 95, 166, 186

M

Madagascar, 97
Malasia, 61
Manila, 89
mar Mediterráneo, 225
mar Negro, 225
marismas (esteros y bañados), 97, 132
Maslow, Abraham, 275
Massachusetts Institute of Technology (MIT), 136
materiales, 33, 36, 38, 41, 52, 64, 70, 110, 111, 113-116, 119, 125, 130, 132, 134, 136, 163, 170, 176, 177, 180, 182, 200, 212, 233, 234, 249, 256, 265, 267, 268, 278
abundancia cortical, 118
agotamiento, 118
consumo mundial, 188
generación de residuos, 120
stocks y flujos, 112
tenor límite, 117
uso *per cápita* en EE UU, 112
mercado, 38, 63, 70, 125, 130, 195, 199, 200, 204, 217, 219, 226, 251, 261, 271, 272
bucle de retroalimentación, 203
definición, 202
propósitos, 223
respuesta a la escasez de recursos o contaminación, 203, 229, 230
retraso, 221-223
señales, 201, 203, 223, 225
y hambre, 227
metales, 111-114, 125, 130, 163, 166, 168, 180, 262
metano, 125, 129, 165, 186
metil cloroformo, 195
México, 53
Mill, John Stuart, 251
Minnesota Mining & Manufacturing, *ver* 3M, 130
modelo, 30, 37, 38, 40, 58, 112, 264, 272, 278
de mercados, 202, 203
de pesimismo y optimismo, 235
de tecnología, 201-203
definición de, 139
modelo mental, 140, 150, 202, 216, 221, 248, 249, 252, 276
modelo, *ver* también modelo World3, 37, 43, 78, 140, 144, 176, 200, 203, 205, 217, 248, 272, 279, 281, 282, 287, 291, 293, 294
validez de, 143
Molina, Mario J., 196
monóxido de carbono, 165
Mumford, Lewis, 256

N

Naciones Unidas, 41, 179
Programa para el Medio Ambiente (UNEP), 84, 192
nanotecnología, 117
National Fish and Wildlife Foundation, 224
National Aeronautics and Space Administration (NASA), 189
necesidades no materiales, 256
Nigeria, 48, 49
no linealidad, 141, 174, 219, 323
definición, 323
Noruega, 125, 163, 224
Nueva Inglaterra, 163, 225

O

Omán, 61
OPEP, 222
ordenador Macintosh, 281
ordenadores compatibles IBM, 281, 294
Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 81, 90, 224
Oriente Próximo, 58, 103, 111, 221, 260
óxido de nitrógeno, 121, 219
óxido nitroso, 125
ozono, 125, 179, 182, 184, 186, 188-192, 195-198, 252

P

Pakistán, 67
Peccei, Aurelio, 29, 249, 275
Pekín, 89
pesca de la ballena, 226, 227
pesquerías, 201, 224-227
ciclos en las, 163
pesca mundial, 224
petróleo, 62, 76, 77, 88, 97, 101, 104, 108, 111, 136, 144, 150
agotamiento, 103
consumo mundial, 33, 100
precios, 113, 221-223
producción, 101, 144, 221, 222
reservas, 88, 101, 103, 206
PIB, 61, 64, 233, 254
comparado, relacionado con la tasa de natalidad, 58
crecimiento *per cápita* varias naciones, 67
EE UU por sector, 65
plomo, 111, 120
población, 30, 34, 36, 37, 40, 48-58, 62, 64, 65, 73, 76-81, 85, 86, 88, 92, 00, 110, 111, 113, 119, 126, 132-134, 136, 137, 139, 163, 172-174, 185, 199, 227-229, 231, 232, 246, 248, 249, 252, 253, 261, 261, 267
en World3, 38, 43, 75, 140, 141, 144-147, 150, 153, 155, 160, 161, 167, 170, 172, 176, 177, 206, 212, 214, 216, 217, 232, 234, 238, 241, 242, 244, 285, 287, 324
equilibrio, 56
estadísticas mundiales, 32, 36, 52
estructura de edades, 60
estructura de sistema de, 68
incremento anual, 54, 55
papel en el deterioro del medio ambiente, 134-136
posibles modelos de comportamiento, 56
y pobreza, 66-70, 250

pobreza, 34, 40, 66, 84, 139, 227, 260, 271, 275
en una sociedad sostenible, 40, 249
y población, 67-70, 249, 250, 255
policlorobifeniles (PCBs), 145, 156, 158, 160, 162
Polo Norte, 191, 192
precio, como señal de sistema, 223
predicciones puntuales, 145
producción agrícola, 62, 63, 64, 121
crecimiento en producción total de granos, 80
métodos sostenibles para, 85
por grano y país, 80
producción y alimentos, *ver* también producción agrícola, 43, 51, 52, 69, 70, 81, 82, 84
adecuación, 80, 81
en el World3, 141, 145, 147, 153, 168, 172, 206, 208, 212, 216, 234, 240, 242, 285
impulsada por la población, 51, 52
producción total de granos, 79
pérdidas en residuos, 79
potencial, 81, 82
total en las regiones del mundo, 79
producción de servicios, 65, 66
crecimiento en EE UU, 67
en World3, 204, 234
producción industrial, 66
crecimiento en EE UU de la, 67
crecimiento exponencial, 32, 43
definición, 62
en World3, 149, 153, 155, 167, 168, 172, 204, 206, 214, 216, 217, 233, 234, 236, 240-242, 244, 246, 255, 290
mundial, 33
producción mundial de madera, 94
Producto Interior Bruto (PIB), 58, 61, 64, 67, 233
como un indicador, 64, 254
definición, 62, 63
producto primario neto
consumo humano de, 98
definición, 98
límites, 99
Protocolo
Protocolo de Montreal para sustancias que afectan a la capa de ozono, 195, 193, 198, 192, 194
Punta Arenas, Chile, 190

R

radicales hidroxilos, 165
reciclado, 77, 112, 117, 119, 204, 264
papel y madera, 96
materiales, 38, 75, 113, 115, 116, 130
recursos no renovables, 90, 99-118, 139, 163, 165, 249, 323, 324
en World3, 149, 152, 161, 167, 168, 170, 172, 204, 208, 212, 219, 233, 234, 236, 238, 240, 241
reducción en la fuente, 216
reglas de sostenibilidad, 252
recursos renovables, 79-99, 132
regeneración, 77
regla de sostenibilidad para, 252
represas, 88, 90, 110
residuos municipales, 115
residuos peligrosos, 123-125, 133, 145, 158, 160, 166, 229
residuos sólidos, 66, 112, 113, 130
generación, OCDE, 35
retraso, 54, 64, 92, 147, 156, 173, 176, 186, 204, 236, 161, 174, 176, 219, 322
definición, 324
en el medio ambiente, 156, 160, 162, 186, 192,
en el World3, 141, 147, 150, 155, 156, 160, 162, 204, 206, 208, 214, 217, 231, 236, 241, 242, 248, 284
en los mercados, 221, 222, 228
papel en el sobrepasamiento, 173
Revolución Industrial, 28, 43, 231, 259-262, 269
Revolución Verde, 200
Revolución Agrícola, 231, 259-261
río Rin, 121, 133
RIVM, *ver* Holanda, Instituto Nacional..., 23, 122
Roxland, F. Sherwood, 179, 187
Ruckelshaus, William D., 259
Rusia, 89, 95

S

Sabah, 227
Sahel, 99
satélite Nimbus 7, 189
SIDA, 217
Singapur, 61
sistema, definición de, 324
sobrepasamiento, 27, 29-31, 37, 38, 47, 133, 166, 167, 199, 221, 224, 228, 242, 255, 259, 272, 276
causas estructurales, 43, 231, 232
condiciones para, 162, 173, 174
definición, 175, 324
del petróleo, 222
ejemplos de, 163, 164
en el mercado, 218, 222, 227
síntomas de, 175
y colapso, 164, 172, 174, 176, 198, 212, 231, 274
y oscilación, 31
sociedad sostenible, 40, 110, 201, 240, 246, 248-258, 263-278
aquello que no es, 249-253
crecimiento en, 250
cultura de, 251, 253
definición de, 248, 249
democracia en, 253
diversidad en, 253
eficiencia en, 251, 254
empleo en, 251, 255
gobierno de, 252
métodos agrícolas para, 85
métodos forestales, 96
orientaciones para, 253-256
pobreza en, 250, 255
recursos energéticos, 252, 254
reglas para, 242
simulación por ordenador de, 240
tecnología en, 223, 251
uso de recursos en, 252, 254
visión de, 253, 365, 366
sostenibilidad, *ver* sociedad sostenible, 38, 40, 95, 116, 228, 241, 242, 246, 248, 248-252,

255, 259, 263, 266, 269, 272, 274, 275
Sri Lanka, 58, 61
stocks, 31, 49, 50, 62, 64, 68, 78, 95, 134, 160, 165, 321-324
contaminación, 85
de recursos, 102, 122, 167
definición, 324
ejemplos, 49
en sistemas de combustibles fósiles, 102
en sistemas de materiales, 112
en World3, 167, 238, 324
papel en el sobrepasamiento, 173
Suecia, 58
Suiza, 53
sumideros, 36, 75-78, 84, 113, 115, 117, 132, 133, 134, 136, 250, 253, 323
definición de, 325
del uso de combustibles fósiles, 101, 102, 103, 107
sumideros para contaminación y residuos, 119-132

T

Tailandia, 57, 61
Taiwan, 59
Tamil Nadu, 89
Tanzania, 80
tasa de natalidad, 32, 52,53, 61, 147, 160, 214, 232, 287
contra PIB *per cápita*, 58
tecnología, 40, 55, 62, 68, 78, 88, 108, 109, 110, 117, 139, 149, 174, 199, 210, 224, 225, 231, 241, 249, 261, 266, 271, 276
biotecnología, 117
bucles, 203, 221
costes de, 251
definición de, 201, 202
en World3, 201
limpia, 130, 205, 242
nanotecnología, 117
propósitos, 223
y deterioro del medio ambiente, 134, 136
y mercados, 38, 200-205, 217-219, 221, 223, 224, 228, 257
tetracloruro de carbono, 195
Thurow, Lester, 136
tiempo, 30, 36, 38, 40, 43, 45, 47, 49, 57, 66, 70, 73, 78, 89, 90, 108, 117, 121, 122, 126, 132, 133, 141, 144, 145, 147, 156, 160, 162-164, 166, 174, 180, 183, 185, 198, 204, 205, 208, 218, 219, 222, 230, 232-234, 240, 246, 248, 253, 265, 268, 270, 274, 275, 276, 278, 324
tiempo de duplicación, 48, 78
tierra, *ver* también erosión, 25, 28, 30, 36, 38, 40, 43, 44, 62, 64, 70, 75-78, 80, 81, 84, 89, 90, 92, 95-99, 102, 109, 110, 112, 117, 119, 124-130, 132, 139, 144, 147, 170, 174
cultivable total, 81, 83, 84
en World3, 140, 141, 150, 152, 155, 156, 163, 164, 167, 168, 172
tierra necesitada, 82
Tolba, Mustafá, 193

Toyota, 263
transición demográfica, 66
definición de, 57
ejemplos de, 58
en el World3, 153, 167, 214

U

U Thant, 41
Udall, Stewart, 199
Unión de Emiratos Árabes, 61
Universidad de Stanford, 98
URSS, 103, 180, 195

V

van de Walle, Etienne, 279
verdad, decir la, 265, 270, 272, 273
vida media del producto, 130
visiones, 263, 265, 273

W

World3, 38, 43, 62, 75, 78, 140, 141, 144-149, 150-153, 155, 156, 160-160-163, 166, 167, 170, 172, 173, 200, 201, 204, 205, 206, 212, 214, 216, 218, 231-234, 236, 241, 242, 244, 246, 248, 255, 284, 287, 291, 324
cambios en, 283, 285
cifras en, 145
cómo leer los escenarios, 154
complejidad, 141, 145
conclusiones de, 279, 246
documentación de, 281, 293
"ensayo estándar", 292
erosión en, 286
escalas para los escenarios, 293
escenarios de, 279, 281, 282, 291, 292, 293
estructura, 37, 283, 284, 291
flujos en, 284, 291
historia de, 293
límites en, 279
mercados en, 201-204
modelo de ordenador, 153, 204, 248
no linealidad, 141, 323
posibles modelos de comportamiento, 285, 293
propósitos, 293
referente, 140
retrasos en, 279, 284, 291
stocks en, 284, 286
supuestos centrales, 176
tecnología en, 205, 291, 292
Worster, Donald, 262

Y

Yakarta, 89